主辦單位　行政院農業委員會農業試驗所
協辦單位　中華植物保護學會

9 789865 455989
GPN：4711000044
定價：非賣品

2021昆蟲應用於動物飼料產業現況研討會專刊
張淑貞、李啟陽、董耀仁、陳淑佩／主編
行政院農業委員會農業試驗所／編印

農業試驗所特刊第 234 號
Special Publication of TARI No. 234

2021昆蟲應用於動物飼料產業現況研討會專刊

Proceedings of the Symposium on 2021 Status of Insect Application in the Animal Feed Industry

主編
張淑貞、李啟陽、董耀仁、陳淑佩
Edited by Shu-Chen Chang, Chi-Yang Lee, Yaw-Jen Dong, and Shu-Pei Chen

行政院農業委員會農業試驗所　　主辦
Taiwan Agricultural Research Institute, COA
中華植物保護學會　　協辦
The Plant Protection Society of Republic of China

中華民國110年11月

農業試驗所特刊 234 號
Special Publication of TARI No. 234

2021 昆蟲應用於動物飼料產業現況研討會專刊

Proceedings of the Symposium on 2021 Status of Insect Application in the Animal Feed Industry

主　　編
張淑貞、李啟陽、董耀仁、陳淑佩
Edited by Shu-Chen Chang, Chi-Yang Lee,
Yaw-Jen Dong, and Shu-Pei Chen

主　　辦
行政院農業委員會農業試驗所
Taiwan Agricultural Research Institute, COA

協　　辦
中華植物保護學會
The Plant Protection Society of Republic of China

中華民國 110 年 11 月

序

人類對肉類食品的需求量逐年增加，同時寵物和經濟動物的蛋白質需求量也一樣，因此未來飼料蛋白供應量將逐漸不足。為解決此問題，除了減少肉類消費、減少食物浪費外，必須開發替代蛋白質來源。當前全球開發新型替代蛋白質種類，聚焦於昆蟲源、植物源與微生物源蛋白；產業成功的關鍵策略則是建立快速、安全與工業化量產技術，以維持穩定的生產成本與不斷成長的需求量。

昆蟲為生物界物種最多的動物，且昆蟲蛋白質具有高營養價值，不同分類群的昆蟲，具有不同的營養組成特性，開發更多飼料用昆蟲種類的量產技術，可符合更多市場的需求。相對於豆粕與魚粉，生產飼料用昆蟲具有收穫時間短、環境適應性佳、飼養空間小、耗氧量低、用水量低之優點，且在熱帶或亞熱帶生產所投入的碳足跡遠低於溫帶地區。同時，在循環農業體系下，昆蟲又扮演分解者角色，可快速分解農業剩餘物、廚餘與人畜糞便等。惟世界各國對於取食不同基質來源的昆蟲產品應用範圍，有不同的規範。

受 COVID-19 疫情影響，動植物源蛋白質生產與運輸成本高漲，導致全球動物飼料生產成本提高，更突顯出具有可持續性與可工業化量產特性的昆蟲源蛋白，成為替代魚粉的首選。國內飼養飼料用的昆蟲，以麵包蟲、大麥蟲與蟋蟀為主，供應觀賞魚、兩棲爬蟲及鳥禽等寵物市場，近年則興起黑水虻。對我國而言，應掌握動物飼料用替代蛋白質產業的巨大商機，以開創新興產業，透過盤點國外相關的生產與品管技術、經濟和環保法規規範等，整合跨領域技術，適度調整或研擬法規及配套措施。

本研討會邀請行政院農業委員會畜牧處、國立中興大學、中央研究院、水產養殖界與本所專家，分別就飼料管理法、飼料用昆蟲發展現況與生產技術、有益微生物、植生素的應用、昆蟲蛋白於養殖漁業的發展潛力、未來水產飼料產業應用、國內法規現況等課題，進行精闢的知識與經驗分享。期待與會人士可從本次研討會內容，獲知此新興產業的發展趨勢，從中啟發具有台灣特色的研發重點，建立具有經濟競爭力與可持續性發展的昆蟲養殖產業鏈。

行政院農業委員會農業試驗所
所長

林學詩

謹識

中華民國 110 年 10 月

「2021 昆蟲應用於動物飼料產業現況」研討會議程表

主辦機關：行政院農業委員會農業試驗所

協辦機關：中華植物保護學會

時間：110年10月19日 (星期二)　9:00-17:00

時間	講題	主講者 / 單位	主持人
08:30-09:00	報到		
09:00-09:20	開幕式及來賓致詞	農業試驗所 / 林學詩 所長	
09:20-10:00	昆蟲作為動物飼料原料之全球產業現況與未來展望	農業試驗所應用動物組 / 石憲宗 組長	謝廷芳 組長
10:00-10:40	新穎飼料原料蛋白質應用於未來水產飼料產業探討	全興國際控股股份有限公司 / 郭怡君 首席技術發展與永續經營長	
10:40-11:10	我國飼料管理法簡介	農業委員會畜牧處 / 陳培梅 技正	
11:10-11:40	昆蟲應用於食品與飼料之國外相關法規回顧	農業試驗所應用動物組 / 李啟陽 助理研究員	
11:40-12:10	綜合討論		
12:10-13:30	中午休息		
13:30-14:10	微生物於昆蟲飼養之研究進展	國立中興大學昆蟲學系 / 吳明城 助理教授	石憲宗 組長
14:10-14:50	功能性植生素於飼料產業的研發與應用	中央研究院農業生物科技研究中心、草藥科技研究專題中心、生醫轉譯研究中心 / 楊文欽 研究員兼執行長	
14:50-15:30	昆蟲蛋白在養殖漁業的發展潛力分析	農業試驗所農業經濟組 / 林盈甄 助理研究員	
15:30-16:10	飼料用昆蟲生產技術回顧	農業試驗所應用動物組 / 王泰權 助理研究員	
16:10-17:00	綜合討論		

目　錄

昆蟲作為動物飼料原料之全球產業現況與未來展望 1
石憲宗

新穎飼料原料蛋白質應用於未來水產飼料產業探討 18
郭怡君

我國飼料管理法簡介 20
陳培梅

昆蟲應用於食品與飼料之國外相關法規回顧 23
李啟陽

微生物於昆蟲飼養之研究進展 31
吳明城

功能性植生素於飼料產業的研發與應用 43
楊文欽

昆蟲蛋白在養殖漁業的發展潛力分析 54
林盈甄

飼料用昆蟲生產技術回顧 64
王泰權

昆蟲作為動物飼料原料之全球產業現況與未來展望

石憲宗 [1,*] 王泰權 [1] 張淑貞 [1] 李啟陽 [1] 姚美吉 [1] 陳昌岑 [2] 陳淑佩 [1] 陳健忠 [3]

[1] 行政農業委員會農委會農業試驗所應用動物組。台灣 台中市。

[2] 行政農業委員會農委會農業試驗所技術服務組。台灣 台中市。

[3] 行政農業委員會農委會農業試驗所應用動物組退休研究員兼組長。台灣 台中市。

摘要

隨著人口增長、消費者環保意識抬頭、農業用地數量有限，迫切需要尋找傳統肉類產品的替代品。由於畜牧生產是人為引起的氣候暖化的主要原因，而生產或提供動物飼料的動植物源蛋白質成分過程，被認為是造成土地占用、初級生產利用、酸化、氣候變化、能源利用、水依賴和魚類資源匱乏的主因，這些影響主要與魚粉生產、蛋白質作物生產和飼料加工電力生產有關。為解決這個問題，需要尋找更可持續性的飲食方式，包括減少肉類消費、減少食物浪費或使用替代蛋白質來源。昆蟲正在世界範圍內被推廣為人類食物和動物飼料。昆蟲蛋白的生產成本將在2030年低於魚粉，歐盟將成為全球昆蟲蛋白生產技術與產業成熟的重鎮，即便如此，預估屆時產量仍不足以支持動物飼料所需。目前歐盟已完成多項不同昆蟲蛋白作為取代魚粉與豆粕的動物飼料產業之生命週期評估研究，期待可為畜牧產業降低碳足跡分數。本報告主要是針對全球養殖動物產業在面臨傳統飼料蛋白質原料日漸不足所採取的重要因應策略之中，從中回顧昆蟲源替代蛋白質的重要研究，包括往昔人類已食用昆蟲的物種及其特性，動物飼料用昆蟲及其產業於歐盟蓬勃發展的緣由、各種昆蟲作為養殖動物飼料的潛力、飼料用昆蟲產業發展現況暨瓶頸、以及未來展望。昆蟲蛋白產業是一個新穎性與可持續性的新興產業，透過回顧國外發展狀況，預期可提供我國發展此產業所需注意的相關課題。

關鍵詞：昆蟲蛋白、動物飼料、魚粉、飼料用昆蟲產業、碳足跡。

前言

根據聯合國的統計資料顯示，從 1950 年到 2020 年，全球人口從 26 億成長至 70 億，並預測 2050 年全球人口將達到 97 億 (Population 2020)。FAO (2004) 資料顯示 1995-2020 年間，全球對肉製品需求量已增長 58%；在 2000-2020 年間，肉類消費量由 2.33 億噸成長至 3 億噸，牛奶消費量從 5.68 億噸增加到 7 億噸，雞蛋產量需求則成長 30%。到 2050 年的趨勢預測，由於人口增加和發展中國家生活水平提高的綜合影響，導致人類對肉類產品的需求量和攝食量大幅增加，同時全球對寵物食品和牲畜飼料的蛋白質需求逐年提高，動物生產的預期擴張，勢必造成全球飼料蛋白的供應短缺 (Boland *et al.* 2013; Bosch *et al.* 2014; Kim *et al.* 2019; Sánchez-Muros *et al.* 2016)。綜觀肉類生產過程，飼養動物明顯影響土地和水資源利用、溫室氣體排放以及生物多樣性，同時生產動物飼料，會用到大量的作物與魚粉，飼料加工也會消耗大量電力。因此，生產動物所需飼料過程，被認為是擴大農耕地面積、影響

*論文聯繫人
E-mail: htshih@tari.gov.tw

初級生產利用、造成土壤酸化、加速能源消耗與依賴水資源的重要因素 (Mungkung *et al.* 2013)。

因應全球人口增長，在確保糧食安全的前提下，面對動物源產品需求增加，生產動物飼料所需動、植物源原料明顯不足等預期問題，開發動物飼料所需的可持續性替代蛋白質來源，已成為全球農業的重要戰略議題。從營養與環境層面來看，食用和飼料用昆蟲可提供人類和動物所需的營養，飼育昆蟲對環境的影響遠低於禽畜魚類等養殖動物，包括溫室氣體排放量減少、土地與用水需求減少及能源使用更合理 (FAO 2013)。昆蟲被認為是動物蛋白潛在可持續來源的主因，在於其飼料轉化效率高 (Nakagaki & deFoliart 1991; Ramos- Elorduy 2008; Looy *et al.* 2014; Van Huis & Oonincx 2017)、生長速度快、繁殖力高，與傳統的家畜和一些農作物相比，生產昆蟲的環境足跡更低，這種符合營養需求和低環境足跡的整合優勢，將可大幅減輕肉類和乳製品等環境足跡較大行業的壓力 (Bessa *et al.* 2020)；同時，小型昆蟲農場飼育昆蟲所需空間與營業成本，遠低於禽畜業與水產養殖業，為貧困家庭提供脫貧機會 (Rumpold & Schlüter 2013)。發展飼料用昆蟲產業的過程和結果，兼顧消除貧困和應對氣候變遷，符合 2016 年 1 月聯合國推動的可持續發展目標 (sustainable development goals, SDGs) 及相對應的行動 (Chia *et al.* 2019)。

以全球視角來看，為因應全球人口增長所需足夠食物，二十一世紀的終極挑戰之一，就是以健康生態系統生產人類所需的一切食物，當代若未能克服可預期的未來困境，我們的後代勢必面臨更多更複雜的挑戰。為此，建立可持續性的動植物生產系統，已成為不可忽視的全球農業重要戰略議題。

台灣為海島型國家，能源、糧食與食物等原物料進口，易受氣候變遷與環境足跡等國際議題影響。為此，本文針對全球養殖動物產業面臨傳統飼料蛋白質原料日漸不足所採取的相關因應策略，從中回顧有關動物飼料之昆蟲源替代蛋白質的重要研究，包括往昔人類已食用昆蟲物種及其特性，動物飼料用昆蟲及其產業於歐盟蓬勃發展的緣由、昆蟲作為養殖動物飼料或寵物食品的評價、飼料用昆蟲產業發展現況，並在未來展望提出發展飼料用昆蟲新興產業所需注意的跨部門與跨領域技術整合、法規調和與政策工具等建議，提供產官學界參考與共思如何整合各行業的既有基礎、開發可降低成本與符合飼料安全的新技術，並調整或釐清相關法規，以建構具有新穎性與可持續性特色的新興產業鏈。

提供人類與動物食用的昆蟲物種及其特性

昆蟲綱 (Insecta) 是全球物種最多的生物類群，1999-2018 年間全球已定名的昆蟲物種，已從 75.1 萬種 (Wilson 1999) 成長至 100 萬種 (Stork 2018)，估計還未定名的物種尚有 550 萬種 (Stork 2018)。由於昆蟲是地球生態圈不可缺少的分類群，試想少了昆蟲的生態環境，地球將會變成什麼樣貌。

昆蟲一直都是人類等多食性動物的替代性動物蛋白質來源之一，主要是用於彌補其他具有周期性或季節性才出現的魚禽獸類動物。Hardy *et al.* (2017) 分析西班牙出土的 120 萬年前人屬 (*Homo*) 化石之牙結石殘留物，發現包含昆蟲脆片、植物纖維、肉類、花粉和真菌孢子等，這是目前人屬物種的最早食蟲 (entomophagy) 紀錄年代。在亞洲、拉丁美洲和非洲有許多民族具有食蟲習性，食蟲為民族文化的一環，但歐洲的民族則普遍存在排斥食蟲的觀念。史載紀錄，2200-2500 年前的中國周禮與禮記，已記載周天子會食用蚳醢 (用螞蟻幼蟲製成的螞蟻醬)；在公元 77 年就有學者記載衣索比亞人會採集蝗蟲食用，即便近代仍對食蟲有恐懼感的歐洲人，1740 年林奈 (Carl Linnaeus) 在其動物學講座提到歐洲人食用蜜蜂、大黃蜂和螞蟻 (Svanberg & Berggren 2021)。Madau *et al.* (2020) 統計全球約有 110 多個國家有食蟲紀錄，主要集中在熱帶地區，Jongema (2017) 統計來自 166 篇研究報告和 12 個網站資料，顯示全球至少有 2,051 種可食用昆蟲 (edible insects)、15 種

可食用蜘蛛及其他 45 種可食用的節肢動物。

由於自然環境下，可自然取食昆蟲的野生動物種類很多，人類長期觀察野生動物與半圈養禽畜的自然取食狀況，累積出養殖動物飼料配方的知識經驗，例如世界各地的野貓食用昆蟲比率，約占其食物量的 6% (Veldkamp *et al.* 2012)，野生鳥類和自由放養的家禽均可自然捕食昆蟲的成蟲、幼蟲和蛹 (Zuidhof *et al.* 2003; Sánchez-Muros *et al.* 2014)。

人類食用昆蟲的手段，從早期的野外採集，到後來為了食用、製藥、製絲綢、製膠、作物或衛生害蟲防治等不同目的，逐漸發展出昆蟲野外採集技術、或半馴化生產技術 (例如僅能透過露天栽培目標昆蟲的寄主植物，誘引昆蟲前來繁殖)、或完全馴化生產技術 (完全透過人為飼養技術維持，亦即養殖昆蟲)，Yen (2015) 指出全球食用昆蟲總供應量，有 92% 來自野外採集，6% 來自半馴化生產，其他 2% 才是養殖昆蟲產業的供應量。

以上顯示，未來想要透過昆蟲來補充人類或養殖動物的動物蛋白，以當前養殖昆蟲產業所使用的昆蟲種類及其總供應量 (產能)，尚有很大的開發空間。事實上，以人為大量飼育昆蟲的技術非常複雜，因為昆蟲的飼養環境 (溫度和濕度) 和種群要求均很嚴格，特別是不同昆蟲在部分繁殖期間 (從卵至幼蟲、若蟲或成蟲期) 或完整繁殖期間 (從本世代到下一世代的卵期)，都有不同的飼育條件。

Leppla (2009) 列出 920 種曾被飼育過的昆蟲，依其所屬目級層次 (order category) 與各目物種所占比率來歸類，鱗翅目 (高於 32.6%)、鞘翅目 (高於 21.7%) 與雙翅目 (約 21.7%) 所占比率居多，其次則為半翅目 (低於 10.8%) 與膜翅目 (低於 10.8%)，其他則為直翅目 (蟋蟀和蝗蟲)、脈翅目草蛉、蜚蠊目蟑螂、等翅目白蟻和蚤目的跳蚤。

由上可知曾被飼育過的昆蟲，多為農作物、倉儲、衛生或園藝等農業害蟲和益蟲，其易被飼養的共通特性，包括絕大多數屬於陸生昆蟲 (少數水生者，如蚊類幼蟲)、體型多為小型或中型、食性則以多食性、植食性與腐食性 (分解者) 居多 (寄生性或肉食性者，多數是為了瞭解其作為生物天敵的應用潛力)、具環境廣適應性與可集約化生產 (生產面積低) 等。同時，飼養昆蟲還需具備專業的昆蟲學知識、科學化分析與知識傳承，才能轉化為可持續性的工業量產技術。以上，可知為何人類自古迄今大規模飼養的昆蟲種類，僅有少數如提供絲綢與食用的家蠶與蜜蜂，以及近十餘年在各大洲普遍運用在養殖漁業與家禽業的麵包蟲與黑水虻。

動物飼料用昆蟲及其產業於歐盟蓬勃發展的緣由

由於世界人口的增長、經濟的發展、更高的消費能力和不斷變化的消費者偏好，預計未來全球農業生產和對食品和畜產品的需求將大幅增加 (Verbeke *et al.* 2015)，預計中國、印度和非洲等發展中國家，未來將以 1.9% 的肉類消費量逐年增長 (Allegretti *et al.* 2018)，如何因應肉類消費所帶來擴增動物飼料消耗所引發的複雜問題，成為全球性的議題。

聯合國糧農組織 (FAO) 和荷蘭 Wageningen University and Research Centre (WUR) 於 2013 年出版「Edible insects: future prospects for food and feed security (食用昆蟲：糧食和飼料安全的未來前景)」，指出 2011 年的世界飼料總產量達 8.7 億公噸，全球商業飼料產值約為 3,500 億美元，其中飼料為畜牧生產最重要的成本，占總成本 70%，這當中又以蛋白質成分的成本最高，並預期至 2050 年飼料總產量必須增加 70% 才能養活全世界，由於動物和魚飼料主要原料為魚粉、魚油、豆粕和其他幾種穀物 (FAO 2013)，截至 2020 年全球飼料的總產量已達 11.88 億公噸，其中最大的增長來自肉雞、豬、水產和寵物飼料(以歐洲成長最快)行業 (Alltech 2021)。

對全球動物和魚飼料產業的挑戰，在於豆粕的來源為大豆，大豆作為飼料除與人類糧食競爭，對耕地不足更是雪上加霜，事實上，全球每年所生產的大豆，

有 85% 被加工製成豆餅和豆油，其中又有 97% 用作動物飼料 (Kim *et al.* 2019)；至於魚粉和魚油則為水產飼料的重要蛋白質和脂質來源，對集約養殖的高營養魚種更是重要，全球總漁獲量的 30% 是被轉化為魚粉和魚油，作為動物和魚類飼料 (Ogunji *et al.* 2006)，由於捕撈漁業的過度開發導致魚粉產量已無法支持飼料逐年增幅的需求，造成魚粉成本逐年攀升。值得注意的是，動物飼料成分的價格變化，對畜牧業獲利程度具有關鍵性的影響。

人們越來越關注將傳統人類食物來源轉用於飼料用途，這種因飼養動物造成與人類競爭資源的窘境，目前正透過提高作物產量 (如培育適應性良好的品種) 和改善農場管理 (如更集約化的作物管理)，達到促進全球作物增產目標，另透過水產養殖以解決捕撈漁業過度開發所導致的漁資源不足 (預估 2027 年全球的水產養殖產量，將超越捕撈漁業產量，至 2030 年則占所有魚類總產量的 52% (OECD/FAO 2021)。

在動物與人類競爭食物過程，上述努力恐怕只是杯水車薪，為了減少環境污染和增加動物福利，並具體實現聯合國擬定的可持續發展目標，促使各國加速研究可取代傳統動物飼料配方的新型替代蛋白質來源，以適度或全面取代動物飼料中的大豆、魚粉與肉粉等。無論是飼養動物或人類可以食用的動植物，其體內所含蛋白質分別被稱為完全蛋白質和不完全蛋白質，此導致當前新型替代蛋白質的研究方向，包括動物源蛋白 (如昆蟲)、植物源蛋白 (如微藻 (microalgae)) 與微生物蛋白質 (microbial proteins) (Kim *et al.* 2019)，然因動物源蛋白所含有的胺基酸組成，更接近人類或人類飼養動物所需，基於動物飼料產業需求，研究上仍以動物替代蛋白最多。昆蟲為地球上物種最多的動物，所具必要胺基酸不亞於傳統牛、豬、雞等食用動物，且飼養過程具高效的飼料換肉率 (feed conversion rate, FCR)、對環境衝擊小的特性，所以被稱之為可持續性的動物蛋白，這也是為何被推薦用於取代傳統魚粉、大豆與肉粉的原因。

儘管歐洲在提供人類消費所需的動物蛋白尚能自給自足，但其氣候條件並不適合廣泛種植大豆等蛋白質作物 (protein crops)，因此每年需進口 70% 的此類作物用於生產動物飼料，由於飼料成本占動物生產總成本的 50-70%，一旦動物飼料原料價格發生變動，對畜牧業的獲利就會產生重大影響 (Verbeke *et al.* 2015)；學者估計歐盟從南美洲進口 1 公斤乾豆粕，就會產生 11.65 公斤的二氧化碳當量 (Martin 2014; Kim *et al.* 2019)，這是歐洲畜牧業需嚴肅面對的碳足跡議題。歐盟委員會 (the European Commission) 於 2018 年 11 月舉辦為期兩天的研討會，討論歐盟蛋白質供應的未來，除我們熟知的昆蟲蛋白之外，尚討論在歐洲領土內發展高度可持續的豆類種植系統，以降低對美國和巴西生產大豆的過度依賴 (Mancuso *et al.* 2019)。近年歐盟國家有愈來愈多學者投入食用與飼料用昆蟲在動物飼料產業的生命週期評估研究，期待可為畜牧產業降低碳足跡分數。但迄今為止，已報告用於飼料和食品的各種食物，在工業規模昆蟲生產上，尚無完整的生命週期評估 (Smetana *et al.* 2016)。

歐洲雖不屬於傳統食用昆蟲的地域，但鑒於氣候變遷勢必造成各國擬定其國內糧食生產和糧食安全等因應政策，預期會引發歐盟社會、經濟和環境的不確定性。基於因應糧食、氣候變遷與環境可持續性的全球尺度問題，歐盟對昆蟲源等新型替代蛋白質的研究，是以支持食用和飼料用昆蟲新興產業為最終目標，因此其研究尺度已細緻到涵蓋科技、法規與政策等各層面，此種發展有別於亞、歐、非與中南美等傳統食用昆蟲國家，這些國家迄今僅具小農生產規模或野外採集販售，缺乏大型企業支持，且絕大多數國家尚缺乏有系統的法規與政策配套作為。

除此，提高蛋白質利用效率，也是歐盟減少飼料蛋白質短缺的另一重要手段，因此歐盟對於昆蟲作為循環農業的生物反應器 (bioreactor)，以及成為可持續性蛋白質來源的研究也相當先進。這些昆蟲可將有機廢物 (如過度浪費的食物、動植物殘渣、動物糞便或農作物副產品等)，轉化為高質量營養物質的能力，也

迅速開啟了創新的循環經濟前景 (Allegretti *et al.* 2018; Chia *et al.* 2019; Pinotti *et al.* 2019)，黑水虻則為循環農業體系最具代表性的昆蟲物種。在建構完整的食用與飼料用昆蟲新興產業過程，歐盟國家也相當注重生產端、應用端與消費端 (農友、企業、民眾) 等利害關係人，對產業支持與否的意向調查研究，例如 Bessa *et al.* (2020) 指出儘管昆蟲在人類的未來食物中，可能占有關鍵席位，但必須先克服消費者對昆蟲接受程度的挑戰，分析顯示西方消費者更願意食用經過加工而看不到蟲體的食物，而不是直接食用可見的蟲體，例如歐洲已經販賣含有家蟋蟀 (*Acheta domesticus*)、黃斑黑蟋蟀 (*Gryllus bimaculatus*) 和麵包蟲 (*Tenebrio molitor*) 加工品的漢堡肉餅。Menozzi *et al.* (2021) 指出提供有關昆蟲飼料作為家禽業蛋白質替代品的環境、安全、營養和口味等相關資訊給消費者，可提高消費者接受昆蟲作為飼料的意願，進而促使他們購買這類昆蟲產品。

總結歐盟目前在飼料用昆蟲的發展現況，根據歐盟 2017/893 條例 (Commission Regulation (EU) 2017/893)，允許 7 種昆蟲可作為生產水產養殖動物的複合飼料成分 (components of compound aquafeeds)，包括黑水虻 (BSF) (*Hermetia illucens*)、家蠅 (*Musca domestica*)、麵包蟲 (*Tenebrio molitor*)、外米擬步行蟲 (*Alphitobius diaperinus*)、家蟋蟀 (*Acheta domesticus*)、帶狀蟋蟀 (*Gryllodes sigillatus*) 和牙買加蟋蟀 (*Gryllus assimilis*)，值得注意的是此條例不允許將昆蟲蛋白用於餵食其他動物。至 2021 年 8 月 17 日歐盟 (EU) 2021/1372 條例 (Commission Regulation (EU) 2021/1372)，修訂歐洲議會和理事會關於禁止用來自動物衍生的蛋白質餵養非反芻類養殖動物 (毛皮動物除外) 的附件四。歐盟自上述修法之後，現在已允許將昆蟲源蛋白質作為豬與家禽飼料、寵物食品 (如狗、貓、鳥或爬行動物) 和毛皮動物 (如貂) 的飼料。

昆蟲作為養殖動物飼料或寵物食品的評價

動物源飼料成分含有易於消化的蛋白質，具有高生物價值和胺基酸特徵。昆蟲在營養價值方面具有多種優勢，其蛋白質的胺基酸組成、脂肪以及其他大量和微量的營養素，通常已可滿足與維持動物良好生長和健康所需，已被證明是動物飼料高質量營養素的可持續供應者 (Gasco *et al.* 2020a; Guine *et al.* 2021)。

飼料用昆蟲被運用在養殖動物的方式，包括直接餵食或經過加工產出的昆蟲粉 (insect meal) 餵食，已被運用的目標動物則有水產動物、藥用爬蟲類動物、毛皮動物、單胃養殖動物、家禽類等和寵物 (貓、犬、兔、鳥類、爬蟲類和兩棲類動物等)。

儘管少數學者早在 50 多年前已開始從事昆蟲作為動物潛在食物的研究 (Barroso *et al.* 2014; Van Huis *et al.* 2020)，但直到 FAO (2013) 倡議昆蟲可作為人類或動物的食物以來，全球僅有極少數昆蟲物種之營養價值，曾被學者研究過。相對於全球已被定名的 100 萬種昆蟲 (Stork 2018)，人類大規模飼養的食用和飼料用昆蟲種類不超過 12-13 種 (Maciel-Vergara & Ros 2017)。再以歐盟所核准的 7 種可作為飼料用的昆蟲種數來看，僅達已知昆蟲物種比率 0.0007%，相對於 2,051 種人類可食用昆蟲物種數目來看 (Jongema 2017)，預期還有更多具有潛力的昆蟲物種值得研究。迄今，昆蟲作為動物飼料 (特別是運用在魚、家禽和豬等三類動物) 的可持續原料來源，尤受寵物食品、禽畜與水產飼料生產公司的關注，其中研究與運用最多的物種則為黑水虻、麵包蟲和家蠅 (Sogari *et al.* 2019)。

本報告整理國外已發展的重要或具潛力飼料用昆蟲的營養價值，並擇要提出已應用在養殖動物的試驗或應用實例，作為國內評估不同養殖動物是否有適合種類的飼料用昆蟲。聯合國糧農組織 (FAO) 在 2013 年推動食用與飼料用的初衷，是為了生產人口增長所需的動物性替代蛋白。因此，所有當前已提出的動物飼料替代蛋白，無論是昆蟲蛋白、藻類蛋白或新興蛋白，其主要目標是「可持續性的提供，而非完全取代魚粉或豆粕等」，至於需有多少程度的替代比率，需

視目標養殖動物種類與昆蟲種類而定。例如 Barroso *et al.* (2014) 指出以各種昆蟲物種所製成的昆蟲粉，作為鰻鬍鯰（*Clarias anguillaris*）、尖齒鬍鯰（*Clarias gariepinus*）、尼羅吳郭魚（*Oreochromis niloticus*）與歐洲比目魚（*Psetta maxima*）等養殖魚類的替代食物為例，高於 30% 的替代率，就會降低生長，這些變因取決於魚類和昆蟲種類；Dierenfeld and King (2008) 研究顯示黑水虻幼蟲在巨溝蛙 (*Leptodactylus fallax*) 體內的營養消化率很差，除鈉和鉀之外，可透過加工（打成泥）來提高巨溝蛙的消化率，此方法可提供足夠的礦物質而無需額外添加鈣。

飼料用昆蟲的胺基酸、蛋白質、脂肪、幾丁質與微量元素等營養特性簡介

昆蟲通常富含蛋白質 (占乾重約 30-68%)，並含有動物生存所需的胺基酸種類 (Gasco *et al.* 2020a)；儘管昆蟲的脂肪酸組成變化很大，但仍富含脂質 (占乾重約 10-30%)，昆蟲也被認為是維生素 (尤其是維生素 B12) 和生物可利用礦物質 (尤其是鐵和鋅) 的良好來源 (Gasco *et al.* 2020a; Payne *et al.* 2016)。

雖然昆蟲被認為是許多養殖動物的天然食餌或飼料蛋白質替代來源，但其營養價值卻取決於昆蟲物種(含種內的不同發育期)、取食習性與飼養系統，尤其是昆蟲取食的基質 (substrate) (Veldkamp & Bosch 2015; Pinotti *et al.* 2019; Gasco *et al.* 2020a)，昆蟲的營養成分高度依賴於飼養基質 (Danieli *et al.* 2019)，例如陸生昆蟲含有少量多元不飽和脂肪酸 (Gasco *et al.* 2020a)，透過餵食含有多元不飽和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acids, PUFA) 或富含礦物質 (minerals) 的天然基質者，可獲得更適合作為動物飼料用途的昆蟲原料 (Pinotti *et al.* 2019)。因此，飼料用昆蟲本身的營養成分，可根據特定養殖動物的飲食營養需求，透過適當的飲食策略進行調節 (Gasco *et al.* 2020a)，由於飼料用昆蟲無法完全提供目標養殖動物所需的一切營養，可在動物飼料適度補充合成胺基酸或礦物質，來解決飼料用昆蟲本身所缺乏的某些必需胺基酸或礦物質。

由於動物並無真正的蛋白質需求，動物實際上需要的是胺基酸，蛋白質是由胺基酸組成的，因此可由胺基酸組成，作為定義蛋白質品質的標準，特別是必需胺基酸和非必需胺基酸間的平衡。昆蟲具有優質胺基酸，富含必需胺基酸，而植物源蛋白通常缺乏蛋氨酸 (methionine) 和亮氨酸 (leucine) 這些常見的限制性胺基酸 (Sánchez-Muros *et al.* 2014)；除此，不同物種的昆蟲，其彼此之間的胺基酸組成和含量變化頗大，即便同種昆蟲的不同發育期，體內的胺基酸含量也不同；同時，不同養殖動物對同種或不同種的飼料用昆蟲的利用效率也不同，昆蟲粉替代比率多寡，對目標養殖動物成長與肉類品質，也有不同影響。例如往昔研究資料也顯示家蠅幼蟲，已廣泛運用在水產養殖魚類和甲殼類動物，Makkar *et al.* (2014) 指出家蠅蛹期的賴氨酸 (lysine) 與含硫胺基酸 (sulphur-containing amino acids) 含量，皆略低於幼蟲期；以大豆為基礎的飼料，對斷奶仔豬添加 10% 家蠅幼蟲粉來代替魚粉，結果顯示對體重增加或飼料轉化效率並無負面影響；Newton *et al.* (1997) 發現黑水虻幼蟲粉的胺基酸、脂質和鈣含量，很適合作為成長豬隻飼料的合適替代成分，但飼料中需補充黑水虻幼蟲粉所缺乏的蛋氨酸 + 胱氨酸和蘇氨酸 (threonine)，Newton *et al.* (2005) 以黑水虻預蛹粉 100% 完全取代乾血漿粉，提供早期斷奶豬隻食用，其成長表現較取代乾血漿粉 50%的組別差；但當黑水虻幼蟲粉以 10-56% 的比例替代大豆和魚粉時，鵪鶉和雞肉具有令人滿意的肉味、香氣和營養成分，證實黑水虻幼蟲粉適合加入家禽飼料之中 (Cullere *et al.* 2018; Onsongo *et al.* 2018)。

往昔昆蟲生理學領域，已有相當多有關昆蟲營養化學成分研究，其中最典型的研究物種為蝗蟲、黑水虻、家蠅、蜜蜂、蚊子、椿象、螢火蟲與家蠶等。至於昆蟲在水產養殖動物和禽畜動物飼料應用的營養價值 (nutritional value) 研究，則集中於近二十年，但

甚少有研究評估多種飼料用昆蟲對單一養殖動物其發育狀況的影響，Sánchez-Muros *et al.* (2014) 的報告回顧了許多昆蟲與魚粉的營養價值比較，在此綜整要點如下，(1) 比較 67 種昆蟲和魚粉的粗蛋白 (crude protein, CP)，有 20 種昆蟲與高級魚粉相近 (CP=60-80%)，另有 28 個昆蟲物種其蛋白質比例相近或略高於豆粕 (CP=45-50%)，這些昆蟲當中以鞘翅目的花椒象鼻蟲 (*Metamasius spinolae*) (69.1%) 和北美龍蝨 (*Rhantus atricolor*)、雙翅目的黑腹果蠅 (*Drosophila melanogaster*) (70.1%) 以及直翅目蝗蟲科的黃肚短角蝗 (*Boopedon flaviventris*) (76.0%)、刺喉蝗蟲 (*Melanoplus mexicanus*) (77.1%) 和豔麗錐頭蝗 (*Sphenarium histrio*) (74.8%) 等三種蝗蟲；(2) 家蠶 (*Bombyx mori*)、墨西哥巴基利斯巨緣椿 (*Pachilis gigas*)、兩種椿象 (*Euschistus egglestoni* 和 *Atizies taxcoensis*)、家蠅和水蠅 (*Ephydra hians*) 的蛋氨酸含量高於魚粉，但所有曾被研究的昆蟲物種，其賴氨酸含量均低於魚粉，以上顯示現有已被研究的所有昆蟲物種的胺基酸組成，均未高於優質理想魚粉，儘管家蠶的胺基酸組成最多，仍缺乏組氨酸 (histidine)、賴氨酸和色氨酸 (tryptophan)；(3) 脂肪酸方面，在昆蟲粉中，與植物油一樣，必需脂肪酸的亞油酸 (Linoleic acid, LA, 18:2 n-6) 濃度高於 α-亞麻酸 (18:3 n-3)。然而，魚粉的高度不飽和脂肪酸 (highly unsaturated fatty acid, HUFAS) 含量很高，尤其是 20:5 n3 (EPA) 和 22:6 n3 (DHA)。EPA 和 DHA 在脊椎動物中具有重要的生物學功能，必須在飲食中加入 EPA 和 DHA，尤其是魚類，因為與營養需求相比，其合成速度較低。陸生昆蟲明顯缺乏 20:5 n3 (EPA) 和 22:6 n3 (DHA)，而水生昆蟲中存在 20:5 n3。因此，水生昆蟲被認為是淡水魚脂肪酸的良好來源。

除此，昆蟲的幾丁質 (chitin) 成分是一種粗纖維 (crude fibre)，其含量與昆蟲物種及發育階段有關，多數養殖動物很難消化幾丁質。雖然如此，Esteban *et al.* (2001) 指出將幾丁質加入海魚飼料可提升大西洋鯛 (*Sparus aurata*) 先天免疫系統 (the innate immune system) 的活性，Kurokawa *et al.* (2004) 研究證實若干海洋肉食性硬骨魚類具有產生內源幾丁質酶的能力。利用昆蟲作為新型的動物飼料添加劑 (feed additives) 也可達到改善養殖動物的腸道健康，此與昆蟲含有月桂酸 (lauric acid)、抗菌肽 (antimicrobial peptides) 和幾丁質等生物活性成分有關 (Chia *et al.* 2019; Gasco *et al.* 2020b)，餵食昆蟲也可提高水產養殖魚類的生長速度和同化效率 (assimilation efficiency) (Kono *et al.* 1987)。

目前對昆蟲營養化學分析研究，絕大多數聚焦在各國傳統的食用或藥用昆蟲。有關昆蟲對養殖動物的營養需求研究，多數集中在歐盟所核准的食用或飼料用昆蟲、或少數待申請評估的昆蟲；較前瞻性的研究相當少，並以水生昆蟲為主，例如挪威國家營養與水產研究所 (National Institute of Nutrition and Seafood Research, NIFES) 研究取食海藻的海帶蠅 (kelp fly, *Coelopa* spp.)，以生產富含 omega-3 脂肪酸的昆蟲產品 (Payne *et al.* 2016)。但自然界尚有數以百萬具有潛力的昆蟲物種，這種數量和多樣性表明在飼料和食品生產鏈中應用昆蟲的複雜性 (Raamsdonk *et al.* 2017)，因為不同物種或同物種的不同發育階段，皆存在不同的營養組成。因此各國在發展適用目標養殖動物的飼料用昆蟲時，可廣泛蒐集與分析往昔報告，基本上同一分類群與取食習性相近的昆蟲，其蛋白質、胺基酸組成與脂肪酸組成相近。

雖然飼料用昆蟲可望取代動物飼料中的部分植物源與動物源蛋白，仍需更多的研究才知道那些昆蟲種類，真正適用於各類養殖動物。另外，為保證提供養殖動物食用的飼料用昆蟲，對食用養殖動物的人類也是安全的，未來有必要針對昆蟲對牲畜毒性作用進行更多研究 (Sánchez-Muros *et al.* 2016)。

全球飼料用昆蟲產業發展現況

為了促進昆蟲作為人類食物和動物飼料，聯合國糧農組織 (FAO) 和荷蘭 Wageningen University

and Research Centre (WUR) 於2014年5月14-17日合作，在荷蘭舉辦第一屆昆蟲餵養世界會議 (The first international conference on insects to feed the world) (Vantomme *et al.* 2014)，此會議主要討論主軸包括 (1) 從自然中收穫昆蟲；(2) 生產昆蟲作為食物和飼料；(3) 食品安全、立法和政策；(4) 從特定生產系統所生產當作飼料的昆蟲；(5) 營養、加工、消費者態度和美食；(6) 環境問題。此會議目標可作為各國發展食用或飼料昆蟲的重要參考，包括 (1) 提高全球認識昆蟲這類替代食物和動物飼料源料替代來源；(2) 策劃最新技術藍圖並確定關鍵主題的知識差距；(3) 確定發展食用昆蟲和飼料用昆蟲的限制因素；(4) 促進昆蟲價值鏈中利益相關者之間的互動；(5) 在相關合作夥伴之間建立跨學科網絡 (inter-disciplinary networks)；(6) 發展有助於分析昆蟲營養組成之標準方法；(7) 促進研擬有關食用和飼料用昆蟲產品之生產和貿易的國際和國家統計數據；(8) 研擬可提升昆蟲作為食物和飼料來源的影響建議。該次會議之後，研究人員和企業家在昆蟲作為食物和飼料的領域取得快速進展，在 2014-2015 年間，至少已有 61 家生產或銷售昆蟲作為食物或飼料的公司 (Dossey *et al.* 2016)，另 BugBurger 網站 (https://www.bugburger.se/foretag/the-eating-insects-startups-here-is-the-list-of-entopreneurs-around-the-world/) 自 2015 年 10 月 23 日開始，提供全球食用和飼料用昆蟲相關產業、昆蟲養殖產業、研究機構之即時清單，本文第一作者在 2019 年 7 月 20 日與 2021 年 9 月 20 日，查詢該網站所列各類型昆蟲相關公司和研究機構數量，發現這段時間雖值全球 COVID-19 疫情發生，但公司總數目仍呈正成長，由 250 家持續成長至 320 家 (不包括昆蟲行業組織和昆蟲倡導組織) (BugBurger 2021)，某些新創公司透過募資籌措數百萬美元加入研發或生產行列 (Feed Navigator: www.feednavigator.com)。

國外生產動物飼料用昆蟲的公司很多，有原來的動物飼料大廠，也有專門生產昆蟲蛋白粉的新創公司，其中屬於國際大廠的包括荷蘭的 PROTIX、英國的 AgriProtein、法國的 Ynsect 和 INNOVA 等公司。其他尚有美國的 EnviroFlight, LLC、Entomo Farms 和 Beta Hatch、加拿大的 Enterra Feed Corporation、法國的 NextProtein 和 Mutatec、西班牙的 Entomotech、英國的 DeliBugs、愛爾蘭的 Hexafly Biotech、荷蘭的 Kreca Ento-Feed BV、比利時的 Nusect、波蘭的 HiProMine、中國的 Haocheng Mealworms Inc、馬來西亞的 Nutrition Technologies 和 Protenga 以及越南的 Entobel 等公司，預計到 2029 年底，用於動物飼料用的昆蟲產值將擴增為 23.86 億美元 (Guine *et al.* 2021)。

以上，昆蟲蛋白粉的最大供應市場為寵物食品，其次才是水產飼料市場，估計約數千公噸的昆蟲蛋白已應用於水產飼料，昆蟲蛋白已被證明對魚類具有營養價值。資料顯示歐盟昆蟲年產量約 6000 噸，相當於 2,000-3,000 噸昆蟲源動物加工蛋白 (insect-derived processed animal proteins (PAPs)) (IPIFF 2019; Mancuso *et al.* 2019; Sogari *et al.* 2019; Niyonsaba *et al.* 2021)。

以目前昆蟲蛋白的價格而言，單憑其優良營養價值，仍不足以廣泛運用。不過，在投資和合作夥伴關係的支持下，昆蟲行業正逐漸擴大規模，生產技術不斷進步並邁向自動化、改善育種技術和法律調適，使得生產效率大幅提升的同時也會促使成本逐漸降低，估計到 2030 年，至少有 50 萬公噸昆蟲蛋白可作為動物飼料和寵物食品，遠高於目前的 1 萬公噸，昆蟲蛋白生產成本於 2030 年將低於魚粉，即便如此，預估屆時昆蟲蛋白總產量仍不足以支持動物飼料所需 (Feed Navigator: www.feednavigator. com)。

未來展望

他山之石可以攻錯 – 從國外發展飼料用昆蟲產業鏈所遇瓶頸反思

以全球角度而言，歐盟是全球發展食用和飼料用昆蟲研究最為積極的經濟體，涵蓋範圍包括政治、環境生態、社會經濟、社會福利、食品安全、跨域科技、法規等層面。從糧食安全和可持續性的角度來看，發展飼料用昆蟲對各國皆是有利的，昆蟲蛋白是可以填補魚粉與蛋白質作物的缺口，雖然現階段發展過程仍有許多待研究的技術問題，但我們可由歐盟從 2013 年開始發展食用與飼料用昆蟲產業的具體經驗來學習。

最簡單的例子，對農民和企業而言，需要深入瞭解昆蟲生產獲利能力和潛在的經濟數據。如果未獲利或生產法規所未允許的動物飼料，農民和企業都不可能投入生產飼料用昆蟲，銀行也不會提供融資，產業鏈中的所有利害關係人對於投資也會產生猶豫。因此，政府官員和科學家在面對這一個新創產業的同時，需有嚴謹的策略規劃，包括進行產業評估、技術缺口與跨域合作、法規調和、研擬跨域 (政治、環境、經濟、科技等) 推拉政策工具等。下列僅針對較重要的課題進行分享，但整體的配套作為，仍需由產官學研界齊聚共思，如此才能發展屬於台灣特色的動物替代蛋白新興產業，特別是目前國內已有基本量能的昆蟲源蛋白未來如何運用的問題。

一、選擇適當的本土昆蟲物種與發展自動化飼養系統

選擇發展飼料用的昆蟲種類，需優先考量可兼顧環境生態平衡及飼料昆蟲種類多元化發展，前者主要須採用本土的昆蟲種類，避免外來昆蟲將其原產地的蟲生病原或天敵，帶到新環境，危及產業發展與自然環境生態危機；後者，主要是參考國外不同養殖動物或寵物最適合的飼料用昆蟲種類，並進行不同市場分析，從中尋找同一分類群 (例如鞘翅目擬步行蟲科的麵包蟲與外米擬步行蟲；直翅目蟋蟀科；雙翅目家蠅科、麗蠅科、水虻科) 的昆蟲物種，並依昆蟲取食與生活習性，設計自動化飼養系統發展。

二、飼料用昆蟲取食的基質

研究顯示昆蟲成為哺乳動物普立昂蛋白載體 (vector of prions) 的可能性，與其飼養基質是否含有普立昂蛋白可依存的物質有關；屬於飼料和食品級材料的商品被認為是安全的，但對動物副產品和人類排泄物則需採取預防性措施；歐盟為此將用於飼養昆蟲的飼料商品 (feed commodities)，分為反芻動物 (ruminant) 和非反芻動物 (non-ruminant) 來源 (EFSA 2015)。歐盟為了避免傳染性海綿狀腦病 (transmissible spongiform encephalopathies, TSE) 透過飼料擴散，禁止使用與反芻類動物有關的廢棄物及動物加工蛋白產品，歐盟規範昆蟲為養殖動物 (farmed animals)，除可提供植物源食物之外，只能餵食歐盟法規 2017/1017 條例所列的動物源飼料，即魚粉、非反芻動物的血液製品、水解蛋白或非反芻動物的明膠和膠原蛋白、雞蛋與膳食產品，且昆蟲不能用糞便、廢物、含有肉、魚的非完美食品 (former foodstuffs) 或源自餐館或餐飲場所的剩餘食物來餵養，歐盟以外的國家在食品安全方面的限制較少 (Pinotti *et al.* 2019; Sogari *et al.* 2019)，不少國家甚至沒有相關法規進行規範。

三、能源消耗與碳足跡分數

相對於大豆與魚粉，目前昆蟲粉的市場相對小很多，很難掌握市場價格，一般公司已習慣根據訂單大小來擬訂供貨價格；以歐盟公司為例，受限於生產過程的法規限制 (如飼養昆蟲的基質種類) 及目前生產規模不大，其昆蟲源的動物加工蛋白價格每公斤達 2-10 歐元，遠高於歐盟以外國家每公斤 0.8-3.5 歐元的生產價格 (Gasco *et al.* 2020a; Mancuso *et al.* 2019)。其實，昆蟲蛋白的成本，也與生產昆蟲種類所需的技術密切相關，也與歐洲氣候環境有關，例如在歐洲等溫帶國家冬季生產昆蟲，需使用電力維持昆蟲最適發育溫度，昆蟲的蟲生病原控制或環境衛生維護等，都是提高昆蟲養殖的成本 (Finke 2002; van Huis 2013; Guine *et al.* 2021)，例如黑水虻用於生物降解的一個缺點是它需要溫暖的環境，在溫帶氣候下可能

難以維持或需消耗電能才能維持量。台灣屬於亞熱帶和熱帶氣候區之間，生產飼料用昆蟲的能源消耗成本，低於歐盟國家，因此碳足跡分數相對低於歐盟國家。

四、生產規模與智慧財產權

儘管昆蟲作為飼料是大自然的一部分，而且商業昆蟲飼養受到亞熱帶與熱帶氣候條件的國家青睞，但大規模生產需有科學化監管和技術投資來支持，以全球食用與飼料用昆蟲大企業普遍分布於歐美來看，未來亞洲、非洲與美洲等熱帶與亞熱帶國家，可望在技術與法規配套措施成熟之後，成為區域或跨國企業生產昆蟲蛋白的熱區。

在水產、禽畜與寵物飼料產業等大規模供應鏈中，使用昆蟲蛋白質來源成為巨大挑戰，此僅能透過自動化養殖和加工，才能提升產量及其加工產能 (FAO 2013)，由於昆蟲養殖自動化產養技術，牽涉跨學門技術整合，發展過程的研發投資成本過高，因此昆蟲養殖企業通常採取智慧財產權 (intellectual property rights, IPR) 政策來保護 (Gasco *et al.* 2020)。為此，若能以昆蟲學知識為基礎，妥善擘劃農業、食品業、工業技術整合的飼料用昆蟲新產業發展策略藍圖，將是我國發展下一個新興產業的重要契機。

五、法規調和

各國對於昆蟲作為飼料的法規管理做法不同 (Sogari *et al.* 2019)，例如歐盟最新法規除允許昆蟲源動物加工蛋白，可作為水產養殖動物、寵物食品以及豬、家禽和毛皮動物的飼料，但在美國需要特別授權，在加拿大則允許家禽和魚類使用黑水虻產品，在中國大陸或韓國則不需要授權。

飼料用昆蟲於台灣的法源依據則為飼料管理法，對於可當作飼料用昆蟲的種類、提供飼料用昆蟲的食物 (或稱飼料、基質) 種類、取食不同食物來源的飼料用昆蟲用途等，均有基本規範，並依國內外發展現況適度調整，例如「飼料管理法」第三條第一項，在「可供給家畜、家禽、水產動物之飼料」之動物性飼料，2.9 列出「蠶蛹、蜂蛹、蠅蛆、蚯蚓、麵包蟲、大麥蟲、孑孓、絲蚯蚓、紅蟲、蝗蟲」、2.10 列出「**水虻粉** (限以 1.植物性飼料餵養所長成之蟲體製成者)」。考量黑水虻在處理 (再利用) 廚餘等類物質的效果良好，為配合國家發展循環經濟，調整水虻餵養基質不再僅限於植物性飼料，透過參考先進國家對傳染性海綿狀腦病在家畜動物的傳播風險，對於餵食植物性飼料以外的其他基質的蟲體，限制僅能用於家禽或水產動物。為此，行政院農業委員會於 2021 年 7 月 20 日預告修正「可供給家畜、家禽、水產動物之飼料」第二點，**增列水虻乾**為動物性飼料，並增列水虻乾 (粉) 之水分含量、餵養基質種類及使用於特定動物 (家禽或水產動物)等條件，以符實際。

由於飼料用昆蟲與昆蟲蛋白產業，對各國而言都是相當新穎性的課題，屬於跨學門與跨部會的新興產業鏈，當中尚有不同主管部門需進行業務分工，或相關法規有待同步調整，茲將台灣已經或即將面臨的重要課題簡列如下，提供相關部會主管機關參考：(1) 昆蟲養殖產業主管機關有待釐清 (楊，2010)；(2) 昆蟲蛋白及昆蟲源相關副產品 (如幾丁質、昆蟲油) 的用途，包括食用 (含人類食品添加劑或食用油)、飼料用、肥料用、生質能油、保健食品、醫療用途 (藥用或傷口敷料) 等，涉及不同主管部門，對生產過程的環境與安全控管程序，可預先思考可能的重複審查問題，以提升產業效能與競爭力；(3) 昆蟲養殖產養規模不一，從單純生產與販售活體、兼具生產與簡單加工 (冷凍乾燥或傳統乾燥)、兼具生產飼料及昆蟲副產品的提取、專門作為肥料等，這當中需考量昆蟲原料的源頭管理 (風險控管)，也就是由不同基質 (如植物性基質、動物性基質、廚餘、動物糞尿) 所飼養出來的昆蟲原料，需有正確的標示；(4) 規劃跨部門討論昆蟲養殖場、昆蟲原料與副產品加工廠、昆蟲肥料工廠的廠址設置、交通運輸與相關主管機關等問題，解決新興或複合產業面臨設廠的土地使用與成本問題；(5) 研擬鼓勵產業自動化的跨領域技術研發、技術整合、品管與創投等配套政策；(6) 參考國外發展經驗與科學報告，針對以

農業廢棄物 (植物性或動物性殘渣)、廚餘、食品加工廢棄物或糞便等有機廢棄物飼養的昆蟲，規範不同基質來源所飼養昆蟲之具體應用範圍，為循環經濟下的昆蟲產業，找出正確的定位。

總結

可供飼料用與食用的昆蟲，基於其具有高營養價值和普遍分布特性，已成為水產、家禽、寵物與毛皮動物的可持續飼料資源。總結當前既有研究結果，證實昆蟲粉可完全或部分取代魚粉和豆粕。鑒於既有作為歐盟及先進國家動物飼料原料的飼料用昆蟲種類有限，且昆蟲的營養價值又與昆蟲種類、棲息地、發育階段、攝食習性以及其他人為提供的基質高度相關，未來唯有開發更多符合不同動物飼料產業與不同養殖需求的飼料用昆蟲種類，才能符合小規模 (家庭式或小型養殖場)、工業規模 (半自動化或自動化養殖場) 養殖動物產業與寵物市場的需求。台灣飼料用昆蟲養殖種類，以麵包蟲、大麥蟲與蟋蟀為主，需求端主要是觀賞魚類、爬蟲與鳥禽等寵物市場，近年興起的黑水虻也有法規規範可以提供的需求端。對台灣而言，如何掌握動物飼料蛋白質原料生產的巨大商機，需在兼顧本土生態與循環經濟的前提下，透過盤點國外飼料用昆蟲的生產與品管技術、經濟、環保與法規等發展重點、產業瓶頸及其解決策略，作為國內技術開發、法規調和與政策整合的參考依據，同時也要思考循環農業體系所生產的昆蟲，其基質有很多是動物糞尿、或具有農藥、抗生素與反芻動物副產品的廚餘或農業廢棄物，此類昆蟲作為肥料利用之外，尚具作為能源與紡織等高經濟價值的原料，通盤思考後，才能建立兼顧經濟競爭力與可持續性發展的昆蟲養殖產業鏈。

參考文獻

楊順堯。2020。昆蟲養殖產業與循環經濟之關聯發展。台灣經濟研究月刊 43: 53-60。

Allegretti, G., E. Talamini, V. Schmidt, P. C. Bogorni, and E. Ortega. 2018. Insect as feed: An emergy assessment of insect meal as a sustainable protein source for the Brazilian poultry industry. J. Clean. Prod. 171: 403-412.

Alltech. 2021. Global feed survey. [Accessed 2021 Sept 23]. https://www.porkbusiness.com/news/hog-production/alltech-global-feed-survey-finds-global-feed-production-grew-1-last-year

Barroso, F. G., C. de Haro, M. J. Sanchez-Muros, E. Venegas, A. Martinez-Sanchez, and C. Perez-Banon. 2014. The potential of various insect species for use as food for fish. Aquac. 422-423:193-201.

Bessa, L. W., E. Pieterse, J. Marais, and L. C. Hoffman. 2020. Why for feed and not for human consumption? The black soldier fly larvae. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 19:2747-2763.

Boland, M. J., A. N. Rae, J. M. Vereijken, M. P.M. Meuwissen, A. R. H. Fischer, M. A. J. S. van Boekel, S. M. Rutherfurd, H. Gruppen, P. J. Moughan, and W. H. Hendriks. 2013. The future supply of animal-derived protein for human consumption. Trends Food Sci. Technol. 29:62-73.

Bosch, G., S. Zhang, D. G. A. B. Oonincx, and W. H. Hendriks. 2014. Protein quality of insects as potential ingredients for dog and cat foods. J. Nutr. Sci. 3, e29:1-4.

Chia, S. Y., C. M. Tanga, J. JA van Loon, and M. Dicke. 2019. Insects for sustainable animal feed: inclusive business models involving smallholder farmers. Curr. Opin. Environ. Sustain. 41:23-30.

Cullere, M., G. Tasoniero, V. Giaccone, G. Acuti, A. Marangon, and A. Dalle Zotte. 2018. Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: meat proximate composition, fatty acid and amino acid profile, oxidative status and sensory traits. Anim. 12:640-647.

Danieli, P. P., C. Lussiana, L. Gasco, A. Amici, and B. Ronchi. 2019. The effects of diet formulation on the yield, proximate composition, and fatty acid profile of the Black soldier fly (Hermetia illucens L.) prepupae intended for animal feed. Anim. 9, 178; doi:10.3390/ani9040178

Dierenfeld, E. S. and J. King. 2008. Digestibility and mineral availability of phoenix worms, *Hermetia illucens*, ingested by mountain chicken frogs, *Leptodactylus fallax*. J. Herpet. Med. Surg. 18:100-105.

Dossey, A. T., J. A. Morales-Ramos, and M. G. Rojas. 2016. Insects as sustainable food ingredients: production, processing and food applications. Academic Press, Cambridge, MA, USA.

Esteban, M. A., A. J. Cuesta, J. Ortuna, and J. Mesegue. 2001. Immunomodulatory effects of dietary intake of chitin on gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) innate immune system. Fish Shellfish Immunol. 11:303-315.

European Food Safety Authority (EFSA). 2015. Scientific opinion on a risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. EFSA J. 13:4257-4317.

FAO. 2004. Protein Sources for the Animal Feed Industry, FAO Animal Production and Health Proceedings. FAO, Bangkok, April 29-May 3, 2002.

FAO. 2013. Edible insects: future prospects for food and feed security. FAO Forestry Paper 171,http://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf

Finke, M. D. 2002. Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. Zoo Biol. 21:269-285.

Gascoa, L., G. Acuti, P. Bani, A. D. Zotte, P. P. Danieli, A. De Angelis, R. Fortina, R. Marino, G. Parisi, G. Piccolo, L. Pinotti, A. Prandini, A. Schiavone, G. Terova, F. Tulli, and A. Roncarati. 2020a. Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. Ital. J. Anim. Sci. 19:360-372.

Gasco, L., I. Biancarosa, and N. S. Liland. 2020b. From waste to feed: a review of recent knowledge on insects as producers of protein and fat for animal feeds. Curr. Opin. Green Sustain. Chem. 23:67-69.

Guine, R. P. F., P. Correia, C. Coelho, and C. A. Costa. 2021. The role of edible insects to mitigate challenges for sustainability. Open Agric. 6:24-36.

Hardy, K., A. Radini, S. Buckley, R, Blasco, L. Copeland, F. Burjachs, J. Girbal, R. Yll, E, Carbonell, and J. M. B. de Castro. 2017. Diet and environment 1.2 million years ago revealed through analysis of dental calculus from Europe' s oldest hominin at Sima del Elefante, Spain. Sci. Nat. 104:1-5.

IPIFF. 2019. The European Insect Sector today: challenges, opportunities and regulatory landscape. IPIFF vision paper on the future of the insect sector towards 2030. [Accessed 2021 Sept. 22]. https://ipiff.org/wp-content/uploads/2019/12/2019IPIFF_VisionPaper_up

dated.pdf
Jongema, Y. 2017. Worldwide list of recorded edible insects. The Netherlands, Department of Entomology, Wageningen University & Research.
Kim, S. W., J. F. Less, L. Wang, T. Yan, V. Kiron, S. J. Kaushik, and X. G. Lei. 2019. Meeting global feed protein demand: Challenge, opportunity, and strategy. Annu. Rev. Anim. Biosci. 7:17.1-17.23.
Kono, M., T. Matsui, and C. Shimizu. 1987. Effect of chitin, chitosan, and cellulose as diet supplements on the growth of cultured fish. Nippon Suisan Gakkaishi 53:125- 129.
Kurokawa, T., S. Uji, and T. Suzuki. 2004. Molecular cloning of multiple chitinase genes in Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. Comp. Biochem. Physiol. B: Biochem. Mol. Biol. 138:255-264.
Leppla, N. C. 2009. Rearing of insects. In: Resh, V.H., Carde, R. (Eds.), Encyclopedia of Insects. Academic Press, San Diego, California, pp. 866-869.
Looy H., F. V. Dunkel, and J. R. Wood. 2014. How then shall we eat? Insecteating attitudes and sustainable foodways. Agric. Hum. Values 31:131-141.
Maciel-Vergara, G. and V. I. D. Ros. 2017. Viruses of insects reared for food and feed. Journal of Invertebr. Pathol. 147:60-75.
Madau, F. A., B. Arru, R. Furesi, and P. Pulina. 2020. Insect farming for feed and food production from a circular business model perspective. Sustainability 12, 5418; doi:10.3390/su1213 5418.
Makkar, H. P. S., G. Tran, V. Heuzé, and P. Ankers. 2014. State-of-the-art on use of insects as animal feed. Anim. Feed Sci. Technol. 197:1-33.
Mancuso, T., L. Pippinato, and L. Gasco. 2019. The European insects sector and its role in the provision of green proteins in feed supply. Calitatea 20:374-381.
Martin, N. 2014. What is the way forward for protein supply? The European perspective. OCL 21: D403.
Menozzi, D., G. Sogari, C. Mora, M. Gariglio, L. Gasco, and A. Schiavone. 2021. Insects as feed for animal poultry: Are Italian consumers ready to embrace this innovation? Insects 12, 435.https://doi.org/10.3390/insects12050435
Mungkung, R., J. Aubin, T. H. Prihadi, J. Slembrouck, H. M. G. van der Werf, and M. Legendre. 2013. Life Cycle Assessment for environmentally sustainable aquaculture management: a case study of combined aquaculture systems for carp and tilapia. J. Clean. Prod. 57:249-256.
Nakagaki, B. J. and G. R. DeFoliart. 1991. Comparison of diets for mass-rearing *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae) as a novelty food, and the comparison of food conversion efficiency with values reported for livestock. J. Econ. Entomol. 84:891-896.
Newton, L., C. Sheppard, D. W. Watson, G. Burtle, and R. Dove. 2005. Using the black soldier fly, Hermetia illucens, as a value-added tool for the managementof swine manure. In: Report for Mike Williams, Director of the Animal and Poultry Waste Management Center. North Carolina State University.
Newton, G. L., C. V. Booram, R. W. Barker, and O.

M. Hale. 1977. Dried Hermetia illucens larvae meal as a supplement for swine. J. Anim. Sci. 44:395-400.

Niyonsaba, H. H., J. Höhler, J. Kooistra, H. J. Van der Fels-Klerx, and M. P. M. Meuwissen. 2021. Profitability of insect farms. J. Insects Food Feed 7:923-934.

OECD/FAO. 2021. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/19428846-en.

Ogunji, J. O., W. Kloas, M. Wirth, C. Schulz, and B. Rennert. 2006. Housefly maggot meal (magmeal): An emerging substitute of fishmeal in Tilapia diets. Conference on International Agricultural Research for Development; Deutscher Tropentag, Bonn, Germany.

Onsongo, V. O., I. M. Osuga, C. K. Gachuiri, A. M. Wachira, D. M. Miano, C. M. Tanga, S. Ekesi, D. Nakimbugwe, and K. K. M. Fiaboe. 2018. Insects for income generation through animal feed: effect of dietary replacement of soybean and fish meal with black soldier fly meal on broiler growth and economic performance. J. Econ. Entomol. 111:1966-1973.

Payne, C. L. R., D. Dobermann, A. Forkes, J. House, J. Josephs, A. McBride, A. Müller, R. S. Quilliam, and S. Soares. 2016. Insects as food and feed: European perspectives on recent research and future priorities. J. Insects Food Feed 2:269-276.

Pinotti, L., C. Giromini, M. Ottoboni, M. Tretola, and D. Marchis. 2019. Review: Insects and former foodstuffs for upgrading food waste biomasses/streams to feed ingredients for farm animals. Animal 13:1365-1375.

Population. Population: the numbers. In: Population Matters | Every Choice Counts | Sustainable World Population. 2020. https://populationmatters.org/the-facts/the-numbers. Accessed 2 September 2021.

Raamsdonk, L. W. D., Van, H. J., Van der Fels-Klerx, and J. de Jong. 2017. New feed ingredients: the insect opportunity. Food Addit. Contam. Part A 34:1384-1397.

Ramos-Elorduy, J. 2008. Energy supplied by edible insects from Mexico and their nutritional and ecological importance. Ecol. Food Nutr. 47:280-297.

Rumpold, B. A. and O. K. Schlüter. 2013. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. Mol. Nutr. Food Res. 57:802-823.

Sánchez-Muros, M. J., F. G. Barroso, and F. Manzano-Agugliaro. 2014. Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. J. Clean. Prod. 65:16-27.

Sánchez-Muros, M. J., F. G. Barroso, and C. de Haro. 2016. Brief summary of insect usage as an industrial animal feed/feed ingredient. p. 273-309. *in*: Insects as sustainable food ingredients: Production, processing and food applications. (Dossey, A. T., J. A. Morales-Ramos, and M. G. Rojas, eds.) Academic Press. 402 pp.

Smetana, S., M. Palanisamy, A. Mathys, and V. Heinz. 2016. Sustainability of insect use for feed and food: Life cycle assessment perspective. J. Clean. Prod. 137:741-751.

Sogari G, M. Amato, I. Biasato, S. Chiesa, and L.

Gasco. 2019. The potential role of insects as feed: a multi-perspective review. Anim. 9, 119; doi:10.3390/ani9040119

Stork, N. E. 2018. How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on earth? Annu. Rev. Entomol. 63:31-45.

Svanberg, I. and A. Berggren. 2021. Insects as past and future food in entomophobic Europe. Food Cult. Soc. DOI:10.1080/15528014.2021.1882170

Van Huis, A. 2013. Potential of insects as food and feed in assuring food security. Annu. Rev. Entomol. 58:563-583.

Van Huis, A. and D. G. A. B. Oonincx. 2017. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. Agron. Sustain. Dev. 37: 43. DOI 10.1007/s13593-017-0452-8.

Van Huis, A. 2020. Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a review. J. Insects Food Feed 6:27-44.

Vantomme, P., C. Munke, A. van Huis, J. van Itterbeeck, and A. Hakman. 2014. Insects to feed the world conference - summary report. FAO and WUR Press, Wageningen, The Netherlands. 13 pp.

Veldkamp T., G. van Duinkerken, and A. van Huis. 2012. Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets: a feasibility study. Lelystad, The Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.

Verbeke, W., T. Spranghers, P. De Clercq, S. De Smetc, B. Sas, and M. Eeckhout. 2015. Insects in animal feed: Acceptance and its determinantsamong farmers, agriculture sector stakeholders and citizens. Anim. Feed Sci. Technol. 204:72-87.

Wilson, E. O. 1999. The diversity of life. W. W. Norton & Company Ltd. Press, New York & London. 424 pp.

Yen, A. L. 2015. Insects as food and feed in the Asia Pacific region: Current perspectives and future directions. J. Insects Food Feed 1:33-55.

Zuidhof, M. J., C. L. Molnar, F. M. Morley, T. L. Wray, F. E. Robinson, B. A. Khan, L. Al-Ani, and L. A. Goonewardene. 2003. Nutritive value of house fly (*Musca domestica*) larvae as a feed supplement for turkey poults. Anim. Feed Sci. Technol. 105:225-230.

Current Status and Future Prospects of the Global Industry of Insects as Animal Feed Ingredients

Hsien-Tzung Shih[1,*], Tai-Chuan Wang[1], Shu-Chen Chang[1], Chi-Yang Lee[1], Me-Chi Yao[1], Chang-Tsern Chen[2], Shu-Peu Chen[1], and Chien-Chung Chen[3]

[1] Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

[2] Technical Service Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

[3] Former Research Fellow and Director, Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

Abstract

Globally, there is an urgently need to find alternatives to conventional meat products, following population growth, consumers' environmental awareness rise, and limited agricultural land. Since livestock production is the primary cause of climate warming, the process of producing or providing animal and plant-derived protein components for animal feed is considered to cause land occupation, primary production utilization, acidification, climate change, energy utilization, water dependence and the lack of fish resources. These effects were mainly related to the production of fishmeal, protein crops, and electricity production for feed processing. It is necessary to find more sustainable diets to solve this problem, including reducing meat consumption, reducing food waste, or using alternative protein sources. Insects are being promoted as human food and animal feed worldwide. The production cost of insect protein will be lower than that of fish meal in 2030. The European Union will become a major hub for global insect protein production technology and industrial maturity by then. Even so, it is estimated that the output will not be enough to support animal feed. At present, the European Union has completed several life cycle assessment studies for the animal feed industry with different insect proteins as a substitute for fish meals and soybean meal. It is expected that it can reduce the carbon footprint of the animal husbandry industry. This review focuses on the crucial response strategies adopted by the global animal farming industry in the face of the increasing shortage of conventional feed protein ingredients. It reviews important researches on replacing proteins with insect sources, including the species and characteristics of insects that humans have eaten in the past, animal feed, the reasons for the vigorous development of insects and their industries in the European Union, the potential of various

*Corresponding author.
E-mail: htshih@tari.gov.tw

insects as feed for farmed animals, the current development and bottlenecks of the insect industry for animal feed, and future prospects. The insect protein industry is a novel and sustainable emerging industry. Reviewing the development status of foreign countries is expected to provide relevant topics that need attention in the development of this industry in Taiwan.

Keywords: Insect protein, Animal feed, Fish meals, Insect industry for animal feed, Carbon footprint.

新穎飼料原料蛋白質應用於未來水產飼料產業探討

郭怡君 [1,*]

[1] 全興國際控股股份有限公司。台灣 桃園市。

摘要

近幾十年，水產飼料大量仰賴海洋資源及大豆產品。這兩項產品除了可應用在水產飼料，提供高品質蛋白質及油脂以外，同時也可供人食用。世界人口近年來快速增長，導致糧食需求上升，然而在有限的土地及過度捕撈的現實下，尋找更適合的新穎成分及飼料，以保持水產養殖永續發展，也顯得更為重要。

現已有許多關於傳統及新穎成分之研究，而研究指出多數新穎成分在生產過程中，排碳量較傳統成分少，對環境也較友善，因而受到關注。然而，現在面臨的問題在於這些新穎成分能否提供足夠的數量及合理的成本？

隨著科技發展，近年來新穎成分之生產技術有顯著的進步，有越來越多新穎成分開始商業化大量生產。其中，有許多可應用於水產飼料。例如，昆蟲粉便是其中之一。

在全興，我們做了許多新穎成分的動物實驗，評估不同新穎成分對於魚蝦的效果，評估的指標包含營養價值、消化率、適口性、氨基酸平衡、脂肪酸平衡、礦物質以及動物生長、存活率和動物健康，以及經濟效益。昆蟲粉普遍含有高蛋白質、熱量及脂質。根據以上這些效益，我們的研究指出昆蟲粉在未來有機會可以部分取代魚粉。在法規方面，昆蟲粉也已在 2017 年通過歐盟委員會規則，獲得許可可以用在水產飼料中。

另一方面，昆蟲粉做為新穎飼料原料需要進一步探討其潛在的風險，例如生物積累、氨基酸或脂肪酸缺乏、甲殼質含量、適口性和消化率之問題。或許這些就是昆蟲粉尚未大量應用在水產飼料的原因。

我們依然需要透過更多試驗，評估各項新穎成分之效益。

關鍵詞：水產飼料、昆蟲粉、魚粉替代。

*論文聯繫人
E-mail: jennifer_kuo@grobest.com

Discussion on the Future Application of Novel Feed Protein to the Aquatic Feed Industry

Jennifer Kuo[1,*]

[1]Grobest Group Limited, Taoyuan City, Taiwan, ROC.

Abstract

Over the decades, aquatic feed products have largely depended on marine resources and soy production. Both fishery and soy products provide quality protein and oil for human consumption as well. The world population has increased rapidly in recent years so the demand for food has increased dramatically. With the challenges of limited land for cultivation and overfishing issues in the ocean, the need to find alternatives for more sustainable feed products has become essential for a sustainable aquaculture industry.

There is a lot of research being done on alternatives that include traditional ingredients and novel ingredients. We now know, the production of most novel ingredients have a lower carbon footprint and are more environmentally friendly. This has attracted lots of attention. However, the challenges today are mostly on the availability in large volumes and at an affordable cost.

We have recently seen production technology for some novel ingredients improve, so more potential novel ingredients are being commercialized and are available in the market. Many of them are good alternatives to be included in aquatic feed, and one such example is insect meal.

At Grobest, we have conducted numerous animal trials to evaluate the performance of different novel ingredients on shrimp and fish. The indicators for evaluation we consider when using alternatives include nutritional value, digestibility, palatability, amino acid balance, fatty acid balance, minerals, as well as animal growth, survival rate, animal health, and economic benefit.

With regards to insect meals, they are often high in protein, energy, and lipids. With these benefits, our research show that insect meals may in the future partially replace fish meal. In terms of regulations, insect meal has already been approved by the EU commission regulation as part of feedstuff ingredients in aquatic feed.

We must, however, conduct further assessment on potential dangers or drawbacks of insect meals. For example: bioaccumulation, deficiencies in amino acids or fatty acids, chitin content, palatability, and digestibility. The above may be reasons why insect meals have yet to be utilized widely in aquatic feed.

Overall, more trials are still required to further evaluate the benefits of novel ingredients.

Key words: Aquatic feed, Insect meal, Fish meal substitute

*Corresponding author.
E-mail: jennifer_kuo@grobest.com

我國飼料管理法簡介

陳培梅 [1,*]　葉昇炎 [1]

[1] 行政院農業委員會畜牧處牧場管理科。台灣 台北市。

摘要

飼料管理法 (下稱本法) 自 1973 年 1 月 12 日制定公布全文施行，最近一次修正版本為 2015 年 2 月 4 日由總統公布施行。本法所稱飼料，係為指經中央主管機關 (行政院農業委員會，下稱本會) 公告，可供給家畜、家禽、水產動物營養或促進健康成長之食料 (可供給家畜、家禽、水產動物之飼料，下稱正面表列飼料)，可分為植物性飼料、動物性飼料、補助飼料與配合飼料等四類；此外，本法所稱飼料添加物，係指經本會公告，為提高飼料效用，保持飼料品質，促進家畜、家禽、水產動物發育，保持其健康或其他用途，添加於飼料且不含藥品之非營養性物質 (可供給家畜、家禽、水產動物之飼料添加物，下稱正面表列飼料添加物)，是以，只有屬於正面表列飼料或飼料添加物範圍內之物質，才能供給家畜、家禽、水產動物作為飼料或飼料添加物使用，反之，則不得使用。

為避免部分正面表列飼料或飼料添加物因製造、加工、分裝或輸入造成之安全或品質差異，本法亦授權由本會視必要性另為公告飼料詳細品目與飼料添加物詳細品目，屬前開詳細品目範圍內產品者，其製造、加工、分裝或輸入，皆需取得許可登記證，其違規相對應之罰則亦較為嚴格，以藉此強化飼料品質之管理，並促進畜牧及水產養殖事業之發展。

隨著全球人口激增且糧食需求增加，氣候變遷下糧食栽種效率不如以往等因素影響，肉類蛋白質能否持續大量生產與穩定的供應，成為令人憂慮的課題。在不與人爭食的前提下，專家開始探討可否更有效率地提供家畜、家禽或水產動物優質的飼料原料。藉由昆蟲蛋白產業之興起，專家發現昆蟲可有效地利用循環資源或部分植物性原料，並在有限的空間內快速長成，周轉率相對較高，且生長過程中所產生的廢棄物，仍可作為優質的肥料或肥料原料，不啻為動物性飼料原料最佳的替代方案。

查昆蟲已屬我國正面表列飼料項下之動物性飼料，目前表列的昆蟲有蠶蛹、蜂蛹、蠅蛆、蚯蚓、麵包蟲、大麥蟲、孑孓、絲蚯蚓、紅蟲、蝗蟲 (第 2.9 項) 及水虻粉 (第 2.10 項) 等項目，其中水虻粉，係本會為防堵非洲豬瘟藉由廚餘傳播產生防疫破口，於 108 年 12 月 26 日修正公告限制其餵養基質與產品態樣，後為我國推動循環農業並為兼顧防範動物疫病之傳播，於 110 年 7 月 15 日預告修正為「水虻乾(粉)」，同時增列水分含量、餵養基質種類及使用於特定動物等條件，以符合相關產業發展之實務需求。

上開昆蟲產品雖為正面表列飼料項目，但非屬飼料詳細品目範圍內產品，係依法可作為飼料使用，但毋須辦理飼料製造或輸入許可登記證，然涉及販售行為時，仍需依本法第 16 條規定申請飼料販賣登記證，並應依法於其包裝或容器上，以中文或通用符號標示相關事項。

本篇簡報將簡介我國飼料與飼料添加物的分類，國內飼料供應的情形，與飼料管理法涉及昆蟲應用於飼料之相關規範等議題。

關鍵詞：飼料管理法、昆蟲、水虻。

*論文聯繫人
E-mail: peimeichen@mail.coa.gov.tw

Introduction to Feed Control Act in Taiwan

Pei-Mei Chen[1,*] and Sheng-Yen Yeh[1]

[1] Animal Farm Management Section, Department Of Animal Industry, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taipei, Taiwan, ROC.

Abstract

The government in Taiwan has had the Feed Control Act in place since its promulgation on January 12, 1973.The current amended version was promulgated on February 4, 2015. The term 'feed' in this Act refers to foodstuffs that provide nutrition to, or promote healthy growth of, livestock, poultry and aquatic animals (Feed Used for Livestock, Poultry and Aquatic Animals, called positive lists for animal feeds); The term 'feed additive' in this Act refers to the non-drug non-nutrient substances proclaimed by the central competent authority to be added into feedstuffs to improve feed efficacy, maintain feed quality, facilitate growth of livestock, poultry and aquatic animals, and keep them healthy. (Feed Additive Used for Livestock, Poultry and Aquatic Animals, called positive lists for animal feed additives).

In addition, the central competent authority (Council of Agriculture, Executive Yuan, R.O.C, called COA) proclaims a detailed list describing the [types of] feeds or feed additives that are subject to mandatory testing for possible changes in biosafety or quality level after manufacturing, processing, packing or importation , in order to strengthen the quality control of feed or feed additives.

Insects are one of the items on positive lists for animal feeds, including silkworm chrysalis, bee pupae, maggot, earthworm, *Tenebrio molitor*, *Zophobas morio*, larva, *Tubifex hattai*, locust, and soldier fly. In order to prevent the spread of African Swine Fever through food waste, the COA has announced the revise of the positive lists for animal feeds on December 26, 2019, about restricting soldier fly's food sources and product types. However, in order to develop circular economy in Taiwan and respect the soldier fly industry demand, the COA has pre-announced the revise of the positive lists for animal feeds on July 15, 2021, about expanding the range of soldier fly's food sources and product types.

In addition, the insects for feeds makers didn't need to apply with the COA for such certificates in manufacturing, processing, packing or import, because the insects are included in positive lists for animal feeds, but not included in the detailed list describing the [types of] feeds. But those who run the business of trading fodder about the insects for feeds need to apply to the municipal or prefecture (city) competent authority for registration. They can start their business only after the registration certificates of sale are issued, and the package or container prior of feeds must comply with Feed Control Act.

*Correspond author.
E-mail: peimeichen@mail.coa.gov.tw

This report will introduce the classification of feeds and feed additives in Taiwan, the situation of domestic feeds supply, and the Feed Control Act concerning insects.

Key words: Feed Control Act in Taiwan, Insects, Soldier fly.

昆蟲應用於食品與飼料之國外相關法規回顧

李啟陽 [1,*] 石憲宗 [1] 姚美吉 [1] 王泰權 [1] 張淑貞 [1]

[1] 行政農業委員會農業試驗所應用動物組。台灣 台中市。

摘要

昆蟲具有食品及替代飼料的潛力，但除大量生產降低成本外，產品安全是說服人們接受的首要條件，而產品安全是需要建立在以法律規範的基礎上。然而目前各國間有關以昆蟲為食品或飼料的管理規則變異極大。明確的管理規則能使生產廠商有所遵循，使民眾瞭解狀況，吃的放心。歐盟2021年正式許可麵包蟲（*Tenebrio molitor* L.）為食品，開啟了以昆蟲為食的希望之路。為瞭解各國間對昆蟲應用於食品與飼料之相關法規現況，將有助於昆蟲資源的正確及永續利用。

關鍵詞：食用昆蟲、食物、飼料、法律、規則。

前言

全球人口數持續增加，根據聯合國糧農組織 (Food and Agriculture Organization, FAO) 的統計，估計在2050年時地球需要養活91億人口，以及數十億基於食用、休閒和寵物而飼養的各類動物，相對也將增加70%的糧食需求 (FAO 2009)。禽、畜及水產為人類主要動物性蛋白質的來源，其傳統飼料來源需要如大豆、穀物及魚粉等來供應。

然因氣候劇烈變遷影響作物種植 (IPPC Secretariat 2021) 及全球漁獲日漸枯竭，飼料價格日愈昂貴。因此研發替代來源成為必要的研究，而其中深具開發潛力的研究議題之一即為昆蟲。

但為什麼選擇昆蟲，Vantomme & Halloran (2013) 提及就環境效益而言，昆蟲具有驚人的飼料轉換率，肉牛生長一公斤的體重需要吃約8公斤飼料，肉豬和肉雞分別需要約4和2公斤飼料 (Fry *et al.* 2018)，而以蟋蟀為例子，昆蟲僅需要約1.7公斤飼料 (Huis *et al.* 2013)。另外在養殖過程中，昆蟲相較於畜禽動物有諸多優點，如排放的溫室氣體較少，所需用水量和土地面積也比較少，所以相對於環境的衝擊較小。就營養健康方面的益處，昆蟲是優質的蛋白質來源，含有許多人體必需胺基酸、維生素、微量元素、無機鹽和碳水化合物，如做為食物和飼料蛋白，都有廣闊的發展前景。在蛋白質及胺基酸組成方面，Feng & Chen (1999) 分析近百種已知的食用昆蟲，多數食用昆蟲種類的胺基酸比例都符合世界衛生組織 (WHO) 與聯合國農糧組織建議的食物胺基酸組成模式。此外，相比於其它動物，昆蟲傳播諸如禽流感(H1N1) 及牛海綿狀腦病俗稱狂牛病 (bovine spongiform encephalopathy, BSE) 等人畜共患病 (即從動物傳染給人類的疾病) 的風險較低。對於民生和社會的益處，食用昆蟲的初級飼養可以是低技術、低成本的投資。養殖食用昆蟲還可能成為開闢財源和提供就業的好機會，在許多國家如泰國、柬埔寨、非洲及中南美洲國家因為生態資源豐富，對於食用昆蟲的採集、養殖可以做為人民增加收入的方法，對於弱勢團體、婦女及老年人而言，養殖昆蟲是個補貼家計的好選項

*論文聯繫人
E-mail: cylee@tari.gov.tw

(Chen & Yang 2015)。另外如昆蟲專業採集或工業化飼養則可以提供多種創業及就業機會。

雖有上述益處，然而一個新穎議題也存在諸多尚待解決的問題，譬如大規模生產技術，利用機械化、自動化、如何提高生產效率，降低生產成本，使昆蟲生產代價低於現有食品或傳統飼料成本。既是新穎食品或飼料，衛生安全性及營養價值分析必不可少，人類是否會過敏或其他病原感染安全也必須重視。雖然已有部分國家人民傳統上已接受食用昆蟲，然全球大多數消費者接受性尚需教育認同。另外在國家或國際也需制訂共同可接受的法律，如此才可在保護群眾安全下促進貿易往來 (Vantomme & Halloran 2013)。瞭解各國間對昆蟲應用於食品與飼料之相關法規現況有助於昆蟲資源的正確及永續利用。本文蒐集國際相關法規資料提供參考。

歐盟

有關昆蟲食品方面，歐盟1997年訂定新穎食品規則 ((EC) 258/97)，2003年修訂將基因改造食品自該範圍排除，並繼之以專屬法律加以管制，2015年11月新通過修正立法新穎食品規則 (EU) 2015/2283將昆蟲視為新穎食品 (novel food)，依規定由業者提出昆蟲品種向歐盟執委會申請成為新穎食品，且將由歐盟食品安全局進行安全與風險評估。但部分歐盟成員國對不接受昆蟲屬於新穎食品的認定，因為其國內已經許可甚至已管理規範市場買賣及食用昆蟲，如丹麥、荷蘭、英國、芬蘭、比利時等國 (Reverberi 2018)。2018年2月法國公司SAS EAP Group 提出申請乾麵包蟲幼蟲 (dried *Tenebrio molitor* larva) 為新穎食品，2021年6月通過為歐盟第1件昆蟲食品 ((EU) 2021/882)，該食品可以整隻幼蟲或磨成粉狀利用。含該蟲食品之食物標籤須標示含該蟲並提醒食用該食品可能會有如食用甲殼動物的過敏反應，或像碰到塵蟎的過敏反應。

其次以昆蟲為飼料方面，歐盟為能提供水產動物與毛皮用動物等非反芻動物的替代飼料使用，在2017年5月公布規則 (EU) 2017/893，為加強使用加工過動物性蛋白質的使用安全及避免、控制及根除傳染性海綿狀腦病 (transmissible spongiform encephalopathies, TSEs)，即避免狂牛症的發生，允許符合生產管理規範的昆蟲牧場養殖的昆蟲及其產品，可作為供應動物性蛋白質飼料的來源。

歐盟對昆蟲相關產品的新修正規定中，要求凡是進口或經過歐盟，都需要提供由獸醫師簽署的健康證明 (health certificate)，其內容需符合相關事項。目前允許製成飼料用昆蟲蛋白質之種類共七種，黑水虻 (*Hermetia illucens*, black soldier fly)、家蠅 (*Musca domestica*, common housefly)、麵包蟲 (*T. molitor*, yellow mealworm)、外米擬步行蟲 (*Alphitobius diaperinus*, lesser mealworm)、家蟋蟀 (*Acheta domesticus*, house cricket)、帶狀蟋蟀 (*Gryllodes sigillatus*, banded cricket)，以及牙買加蟋蟀 (*Gryllus assimilis*, field cricket)。生產加工過的昆蟲或相關產品，不能供人類食用，僅供水產動物與毛皮用動物飼料用。其製備與存放的廠房需經過主管機關認可、驗證與監督，並符合 (EC) No 1069/2009 條款之24的要求。昆蟲加工方式必須採用 (EU) No 142/2011 附件IV第三章的加工方法 [1]-[2]-[3]-[4]- [5]-[7]。餵養昆蟲的基質 (substrate) 可以單純為非動物性原料或以下10類動物性原料，如1. 魚粉、2. 非反芻動物源的血粉產品、3. 動物來源的磷酸氫鈣 (二鈣) 與磷酸鈣 (三鈣)、4. 非反芻動物的水解蛋白、5. 反芻動物皮或皮膚的水解蛋白、6. 非反芻動物的明膠或膠原蛋白、7. 蛋及蛋品、8. 乳、以乳為主原料產品、自乳衍生的乳製品、初乳、9. 蜂蜜及10. 化製油。不得使用糞便、廚餘或其他廢棄物為餵養基質。產品上市前，需逢機採樣進行沙門氏桿菌屬 (*Salmonella*) 及腸桿菌科 (Enterobacteriaceae) 病原微生物檢驗。自昆蟲牧場生產的加工過的動物性蛋白質或其相關產品生產過程需避免狂牛症及綿羊搔癢病 (classical scrapie) 等可能因素污染 (李 & 蕭

2018)。但楊 (2020) 提到前述內容都是只針對「飼料用昆蟲蛋白」的規定。因為參考歐盟條例 (EU) No 142/2011若使用活蟲、乾燥蟲體以及蟲油未被列為飼料原料，若拿來餵飼畜禽動物將不受前述內容規範，屬於目前歐盟法規模糊地帶。另外若使用活蟲或乾燥蟲體作為寵物食品，則須遵守該條例附件XIII之寵物食品規範。

比利時

比利時聯邦食品安全局 (Federal Agency for the Safety of the Food Chain) 已經制定特別條例管理食用昆蟲，公告十種昆蟲作為可食用昆蟲，但卻不允許從非歐盟地區進口食用昆蟲 (Reverberi 2018; 楊 2020)。

德國

配合歐盟決定，昆蟲或昆蟲的其他部分都為新穎食品，不能在德國販售，直到通過歐盟新穎食品批准 (Reverberi 2018)。

美國

美國食品及飼料主管機關為食品藥物管理局 (U.S. Food and Drug Administration, FDA)，生產食品或飼料工廠需登記管理。對新穎食品相對極少規範，新穎食品上市前沒有法律需求規範。目前已有昆蟲牧場及供應食用昆蟲的餐廳，卻沒有清楚的法規規範。食用昆蟲如被考慮成食品添加劑，依據美國聯邦食品藥物和化妝品法案 (Federal Food, Drug, and Cosmetic Act)，食品添加劑應受上市前審查及FDA批准才能上市，除非屬於GRAS (generally recognized as safe) 物質則免審查上市。一個公司如將食用昆蟲直接上市，則風險責任需自負。如申請為GRAS物質，費用昂貴。缺乏聯邦政府管理規則導致各州間管理食用昆蟲不一致，各個城市間有的接受有的則不行。所有昆蟲產品必須標示所含之昆蟲普通名、學名及潛在食用甲殼類可能發生過敏的警語。另外如以昆蟲為動物飼料，FDA管理動物飼料類同以昆蟲為食品管理方式 (Lähteenmäki-Uutela *et al.* 2017)。

加拿大

昆蟲如已在世界任何一個地方已有傳統紀錄被食用，則不列為新穎食品，食用昆蟲如被考慮當作食品或食品成分則不被認為是新穎食品。加拿大衛生部 (Health Canada) 已將家蠶 (*Bombyx mori*)、家蟋蟀、麵包蟲列為非新穎食品，昆蟲食品如在市場販售，其必須符合同如其他上市食品一樣的食品安全衛生標準。以昆蟲為寵物食品已在市場上販售，但以昆蟲為動物飼料需要上市前註冊授權，黑水虻2016年已被授權為肉雞新穎昆蟲飼料 (Lähteenmäki-Uutela *et al.* 2017; FAO 2021)。

墨西哥

在墨西哥食用野外採集的昆蟲是一件很普遍的現象，一般說來食用昆蟲貿易及其市場缺乏管理。當在栽種玉米、豆子或苜蓿田捕捉蝗蟲作為食品或動物飼料被認為是一種非正式的蟲害管理手段，但有些地方基於健康因素已避免捕捉食用轉基因作物的昆蟲。某些州如Oaxaca提議以農場飼養昆蟲，但昆蟲農場如同一般動物農場管理規則管理。昆蟲食品已在市場販售，主要為採集昆蟲來源。有機昆蟲受到管制，轉基因食品受監管，無新穎食品監督。飼料原料一般不需要註冊。現有食品管理規範落後國內每日採集及食用昆蟲現象，為永續從田間採集或農場飼養昆蟲，急需立定管理規則 (Lähteenmäki-Uutela *et al.* 2017；FAO 2021)。

澳洲及紐西蘭

昆蟲食品已在市場販售，在澳洲許多昆蟲都有被原住民食用的傳統，而養殖昆蟲供商業用途則才剛開始。依據澳大利亞及紐西蘭食品標準 (the Food Standards Austra lia New Zealand (FSANZ)) 新穎食品諮詢委員會 (Advisory Committee on Novel Foods (ACNF)) 認定，大麥蟲、麵包蟲、家蟋蟀被認為是非傳統食品但也非新穎食品，這意味著他們只要遵守常規食品標準規範 (Food Standards Code)，免於上市前批准要求。飼料原料一般不需要註冊，至於以昆蟲為原料的動物飼料目前僅能餵飼家禽、水產養殖、精選的寵物食品，不能供反芻動物食用 (Lähteenmäki-Uutela *et al.* 2017； FAO 2021)。

中國

在中國已有許多可食用的昆蟲種類在傳統上被食用，昆蟲食品已在市場販售，另昆蟲傳統也已用於醫藥及健康食品。2014年衛生部已將蠶蛹列為食品。雖然沒有關於食用昆蟲的全國性法律或標準，但有地方已建立當地標準。例如，2016年廣西壯族自治區製定了食用冷凍新鮮蠶蛹食品安全地方標準 (DBS45/030–2016)，這些標準規定了食用冷凍蠶蛹生產的衛生要求、加工、運輸和儲存以及食品標籤和檢查蠶蛹的方法。新穎食品法規適用於普通食品，新的飼料原料需要授權 (Lähteenmäki-Uutela *et al.* 2017; FAO 2021)。

泰國

在泰國，食用昆蟲屬於食品法 (Food Act B.E. 2522 (1979))，這是一般法，管理食物品質和完整。食品和藥品管理局 (Food and Drug Administration) 隸屬公共衛生部 (Ministry of Public Health) 是主要的權威機構負責管理昆蟲生產和消費 (Halloran *et al.* 2015)。 2017年，泰國農業部 (Ministry of Agriculture) 轄下國家農產品暨食品標準局 (Thai National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards (ACFS)) 發佈蟋蟀飼養指南。資料包含有關農民如何在正確的標準下，安全有效的利用加工設備飼養蟋蟀。另一套指導方針是在2012年，它提供了養家蠶的指導及絲綢生產 (FAO 2021)

馬來西亞

以昆蟲為食品及飼料已在市場販售，但無特別法律針對昆蟲食品管理。依據食品法 (Food Act 1983) 定義動物包括馴養或其他方式獲得的四足動物、鳥類、魚類、爬行動物或昆蟲之全部或部分可供人類食用。另外飼料法 (Feed Act 2009) 也無明確針對以昆蟲為飼料的規範，但定義飼料是指任何單一或多種材料，無論是加工、半加工或未加工的，旨在餵養動物 (Said & Bae 2019)。

韓國

韓國積極發展昆蟲產業，於2010發布昆蟲產業培育和支持法案 (Act on Fosterage and Support of the Insect Industry)。該法案的目的不僅為了增加養殖戶家庭收入及國家經濟健康發展，也有利於培養人民的情感和支持昆蟲產業，形成發展的基礎和支持促進對昆蟲生態的認識。法案定義昆蟲種類為鍬形蟲、獨角仙、螢火蟲、黑色指突水虻 (*Ptecticus tenebrifer*)、*Cetonia pilifera* (金龜子)、熊蜂及其他農林畜產食品部 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, MAFRA) 規定的種類。

2020年7月農林畜產食品部已將15種昆蟲合法登記為“家畜”。此外食品醫藥品安全處 (Ministry of Food and Drug Safety, MFDS, 2020) 也將獨角仙 (*Allomyrina dichotoma*) 幼蟲、蜜蜂 (*Apis mellifera*)、*Bombycis corpus*、家蠶、黃斑黑蟋蟀 (*Gryllus bimaculatus*)、日本稻蝗 (*Oxya japonica*)、

白點花金龜（*Protaetia brevitarsis*）幼蟲、麵包蟲幼蟲及大麥蟲（*Zophobas atratus*）幼蟲等9種昆蟲在韓國食品法典（Korean Food Code）中註冊為一般食品成分（Ham *et al.* 2021）。

台灣

有關昆蟲作為食品，我國衛生福利部食品藥物管理署彙集經評估食用安全性之非傳統供食原料而訂定之「可供食品使用原料彙整一覽表」內有關「昆蟲及其來源製取之原料」列出包括紅蚯蚓（*Lumbricus rubellus*，環節動物，非昆蟲)、蜂蛹、蠶蛹、擬黑多刺蟻（*Polyrhachis vicina*)，以及昆蟲衍生食品花粉、蜂王乳、蜂蜜、蜂膠、蜂膠樹脂、蜂蠟及蠶絲蛋白等物質（https://sheethub.com/data.fda. gov.tw/ 可供食品使用原料彙整一覽表/i/67/昆蟲及其來源製取之原料)。

雖然早年台灣鄉村閒暇之餘會去採集危害香蕉、竹子上的象鼻蟲幼蟲，或是田地裡的蟋蟀、蝗蟲，或俗稱筍龜的竹子大象鼻蟲（*Cyrtotrachelus thompsoni*）幼蟲，以或煎或烤的方式將昆蟲煮熟後，當成零食。而目前在一些餐廳或是夜市攤販仍偶見昆蟲料理，例如蜂蛹炒蛋、香酥蟋蟀、酥炸金蟬等。臺灣目前也已有民間企業對於食用昆蟲進行養殖量產，例如黑水虻或是黃金水虻（*Ptecticus aurifer*）的幼蟲做為動物性蛋白來源（Chen & Yang 2015），有公司標榜適用於各種烹飪供人食用且經SGS檢驗確認無沙門氏菌及大腸桿菌。另外也有養殖食用昆蟲的企業在太陽能屋頂下除了栽培安心農產品外，還以設施養殖黃斑黑蟋蟀（*Gryllus bimaculatus*)，並製成蟋蟀料理及蟋蟀餅乾等產品。從食品原料一覽表可看出蟋蟀及黑水虻幼蟲皆未被納入「可供食品使用原料彙整一覽表」蟋蟀及黑水虻幼蟲在台灣是否可歸類為傳統食品大有問題，因此出現是否可食用的法律問題，未來若世界食用昆蟲趨勢普及，為符合食用昆蟲產業變化及食品安全，政府似乎應提前部署。

有關以昆蟲為飼料，這部分資訊參考行政院農業委員會飼料管理系統網頁（http://permit.coa.gov.tw/Feed/Unlogin/index.action)。我國飼料管理法於1973年1月12日公告，最近於2015年2月4日公佈修正。第一條說明為保持飼料品質之水準，促進畜牧及水產養殖事業之發展，以維護國民健康，特制定本法。其中畜牧及水產養殖不適用非供食用之動物（如競賽、實驗、觀賞或伴侶動物）及寵物（犬、貓），上述動物屬動物保護法管理。飼料管理法飼料類別分為4類，1. 植物性飼料：植物、植物產品或其加工品。2. 動物性飼料：動物、動物產品或其加工品。3. 補助飼料：礦物質、維生素、胺基酸或其加工品。4. 配合飼料：兩種以上之飼料調配製成品。2015年12月2日訂定「可供給家畜、家禽、水產動物之飼料參考物質表」為正面表列，2019年12月26日公告修正，其中動物性飼料2.9含蠶蛹、蜂蛹、蠅蛆、蚯蚓、麵包蟲、大麥蟲（*Zophobas morio*)、孑孓、絲蚯蚓、紅蟲(*Tubifex hattai*)、蝗蟲，參考物質例如：麵包蟲/麥皮蟲/麵包蟲粉、大麥蟲/超級麥皮蟲、蚯蚓粉等。其中修法重點：刪除原2.9「水虻」項目，增列2.10「水虻粉」項目為限以1. 植物性飼料餵養所長成之蟲體製成者。水虻參考物質為黑水虻、黃金水虻、鳳凰蟲（Feng huang worms；黑水虻及黃金水虻之幼蟲)。而一個飼料或飼料添加物工廠之設立，除應符合飼料或飼料添加物工廠設廠標準，並依法辦理工廠登記外，尚需辦理飼料或飼料添加物製造登記證才是合法生產製造。

結語

歐盟為防止狂牛症藉由飼養昆蟲進行傳播，限定昆蟲蛋白只能以植物性基質及10種限定動物性原料為主要昆蟲餵養食料，並禁止使用糞便、廚餘及其他廢棄物養殖，同時也僅能供水產動物與毛皮用動物的飼料使用（李&蕭 2018)。而國內2019年12月26日公告修正「可供給家畜、家禽、水產動物之飼料參考物質表」，其中增列2.10「水虻粉」項目，限以植物性飼

料餵養所長成之蟲體製成者。由上述2個例子得知，如以昆蟲為食品或飼料，其源頭餵飼昆蟲之食物即需注重安全性。昆蟲具有食品及替代飼料的潛力，但除大量生產降低成本外，產品安全是首要條件，而產品安全需要建立在法律基礎上，然而目前各國間有關以昆蟲為食品或飼料的管理規則變異極大。雖各國狀況不盡相同，但明確的管理規則才能使生產廠商有所遵循，如歐盟2015年(EU) 2015/2283將昆蟲視為新穎食品，2018年法國公司SAS EAP Group 提出申請乾麵包蟲幼蟲 (dried *Tenebrio molitor* larva) 為新穎食品，2021年6月通過為歐盟第1件昆蟲食品 ((EU) 2021/882)，在法規及明確科學審查制度下，使民眾瞭解狀況，吃的放心。以上希望本文有助於國內相關產業發展參考。

參考文獻

李春芳、蕭宗法。2018。2018年歐盟對飼料用昆蟲蛋白相關產品之規範介紹。農政與農情 314:117–120。

楊舜堯。2020。昆蟲養殖產業與循環經濟之關聯發展。台灣經濟研究月刊 43 (7):53–60。

Chen, Y. F., and P. S. Yang. 2015. Edible insects: the one hundred reasons of eating bugs. Nat. Conserv. 90:44–51. (in Chinese)

FAO. 2009. How to Feed the World in 2050. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf (visit on 8/12/2021)

FAO. 2021. Looking at edible insects from a food safety perspective. Challenges and opportunities for the sector. Rome. https://doi.org/10.4060/cb4094en

Feng, Y. and X. M. Chen. 1999. Review on nutritive value of edible insects. Forest Research 12:662–668。(in Chinese with English abstract)

Fry, J. P., N. A. Mailloux, D. C. Love, M. C. Milli, and L. Cao. 2018. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? Environ. Res. Lett. 13 024017

Halloran, A., P. Vantomme, Y. Hanboonsong, and S. Ekesi. 2015. Regulating edible insects: the challenge of addressing food security, nature conservation, and the erosion of traditional food culture. Food Secur. 7:739–746.

Ham, Y. K., S. W. Kim, D. H. Song, H. W. Kim, and I. S. Kim. 2021. Nutritional composition of white-spotted flower chafer (*Protaetia brevitarsis*) larvae produced from commercial insect farms in Korea. Food Sci. Anim. Resour. 41(3):416–427.

Huis, A. V., J. V. Itterbeeck, H. Klunder, E. Mertens, A. Halloran, G. Muir, and P. Vantomme. 2013, Edible Insects: Future Prospects for Food and Feed Security. FAO Forestry Paper 171. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 187 pp.

IPPC Secretariat. 2021. Scientific Review of the Impact of Climate Change on Plant Pests – a Global Challenge to Prevent and Mitigate Plant Pest Risks in Agriculture, Forestry and Ecosystems. Rome. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. 72 pp.

Lähteenmäki-Uutela, A., N. Grmelová, L. Hénault-Ethier, M-H. Deschamps, G. W. Vandenberg, A. Zhao, Y. Zhang, B. Yang, and V. Nemane. 2017. Insects as food and feed: laws of the European union, United States, Canada, Mexico, Australia, and China. Eur. Food Feed. Law Rev. 12:22–36.

Reverberi, M. 2018. Raft of changes to the legal

status of edible insects around the globe. https://www.foodnavigator-asia.com/Article/2018/03/12/Raft-of-changes-to-the-legal-status-of-edible-insects-around-the-globe (visit on 8/30/2021)

Said, S. M. and Y. J. Bae. 2019. Legislation to foster and support the insect industry: something for Malaysia to ponder. Serangga 24(2):90–103.

Vantomme, P. and A. Halloran. 2013. The contribution of insects to food security, livelihoods and the environment. FAO Technical Report I3264E/1/04.13. 4 pp.

Review of Relevant Foreign Laws and Regulations on Insects Used in Food and Feed

Chi-Yang Lee [1,*], Hsien-Tzung Shih, Me-Chi Yao [1],
Tai-Chuan Wang[1], and Shu-Chen Chang[1]

[1] Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung City, Taiwan, ROC.

Abstract

Insects are potential resources for human consumption and animal feed. Besides reducing costs in mass production, the first requisite for customer persuasion is product safety. Legal rules are the basis of product safety. Legal rules on the use of insects as feed and food vary across the world. Precise rules give not only the straightforward guidelines to manufacturers but also safety to customers. The European Commission has approved the consumption of dried *Tenebrio molitor* larva in the EU in 2021. This is the first time that an insect has been approved as a novel food in the EU. It represents the path of hope for the insect as food in the future. Understanding legal rules among nations facilitate sustainable management of insect for food and feed.

Key words: Edible insects, Food, feed, Law, Regulation.

*Corresponding author.
E-mail: cylee@tari.gov.tw

微生物於昆蟲飼養之研究進展

陳妤欣 [1] 洪乙庭 [1] 馬威鈞 [1] 吳明城 [1,*]

[1] 國立中興大學昆蟲學系。台灣 台中市。

摘要

昆蟲擁有豐富的昆蟲微生物資源，這些微生物可以幫助宿主分解食物、降解來自環境中的化合物、合成一些必需營養或抵抗病菌的物質等，具有廣泛的應用價值。已有多篇研究證實，於昆蟲腸道中共生之微生物可間接或直接影響宿主的健康狀況。本研究室主要進行蜂類 (西方蜂、東方蜂、熊蜂、無螫蜂等) 生物學研究，其中針對蜂腸道微生物進行分離，並分析微生物對於蜂之生理影響，本文特別介紹從本土熊蜂腸道分離出之腸膜明串珠菌 (*Leuconostoc mesenteroides*) 之特性、其發酵菌液對蜂基因表現之影響和該菌於蜂群之擴散現象；此外我們同時衍伸介紹常見的雙翅目和半翅目昆蟲之微生物研究。

關鍵詞：微生物、雙翅目、半翅目、蜜蜂。

前言

昆蟲是世界上物種數量最多、個體數量最大、生活方式最多樣的生物，因此造就多樣性的微生物與其共生，這些微生物可以幫助宿主分解食物、降解來自環境中的化合物、合成一些必需營養或抵抗病菌的物質等，具有廣泛的應用價值 (Engel & Moran 2013; Beemelmanns *et al.* 2016; Berasategui *et al.* 2016; Jing *et al.* 2020)。許多昆蟲已經被大量飼養成為我們農業經濟的重要一環，如下：(1)做為可食性動物飼料使用，例如：蟋蟀 (cricket)、麵包蟲 (*Tenebrio molitor*, mealworm)、黑水虻 (*Hermetia illucens*, black soldier fly)、家蠅 (*Musca domestica*, housefly) 等，(2) 蜂產品和農作物授粉使用，例如：西方蜂 (*Apis mellifera*)、東方蜂 (*Apis cerana*)、無螫蜂亞科 (Meliponinae) 和熊蜂 (*Bombus* spp.) 等，(3)做為天敵使用，例如：菸盲椿象 (*Nesidiocoris tenuis*)、蚜繭蜂科 (Aphidlidae)、龜紋瓢蟲 (*Propylea japonica*)、基徵草蛉 (*Mallada basalis*) 等，昆蟲於大量飼養的過程會遭遇病原菌和宿主營養的問題，因此各昆蟲的腸道益生菌種類已被廣泛探討，其中以蜜蜂腸道菌種類以及其功能開發最深入 (Jung *et al.* 2014; Kwong & Moran 2016; Smith *et al.* 2017; Park *et al.* 2019; Klammsteiner *et al.* 2020; Shan *et al.* 2021)。

現今聯合國糧食及農業組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 和世界衛生組織 (World Health Organization, WHO) 將益生菌定義為「足量使用的情況下，可改善宿主腸內微生物相之平衡，並對宿主健康有益的單種或多種混合之微生物」，活的微生物於生物體皮膚、腸道及生殖道等環境定殖，沒有致病性且能與致病微生物競爭，便有潛力成為益生菌。益生菌對人類常見的益處有腸胃道保健、減緩過敏、生殖道保健、調節血糖及改善免疫力等 (FAO/WHO, 2001)。

*論文聯繫人
E-mail: mcwu12@gmail.com

以人類腸道而言，腸道負責消化食物並經由上皮細胞運輸營養物質至全身，提供生存所需要的能量。在消化過程中，腸道共生菌群提供膳食營養，並刺激細胞更新、黏膜形成和蠕動來發揮腸道屏障功能，且健康的微生物群還可以抵抗入侵病原菌 (Boleij & Tjalsma 2012)。已有多篇的研究證實，於宿主腸道中共生之微生物可間接或直接影響宿主的健康狀況，當腸道菌群多樣性降低或致病菌入侵嚴重時，甚至會造成人類的罹癌 (Boleij & Tjalsma 2012)、慢性腎臟病 (Sampaio-Maia *et al.* 2016)、精神疾病 (Sherwin, Dinan *et al.* 2018)，因此腸道共生菌成為改善宿主體質的研究焦點。以昆蟲而言，腸道微生物可協助宿主降解腸道食物，供給營養給昆蟲；另外，也可釋放代謝物提供給昆蟲，影響昆蟲生理；目前已有研究證實移除腸道內共生菌會使昆蟲無法生存 (Douglas 2014)。

昆蟲的消化道基本結構在不同的種類中是相似的，分為前腸 (foregut)、中腸 (midgut) 與後腸 (hindgut) 三個部分 (圖 1) (Engel & Moran 2013)，前腸通常負責暫時儲存或磨碎食物；中腸為主要行消化吸收的部分，有一個由上皮細胞分泌的圍食膜 (peritrophic matrix) 的構造，會不斷地脫落更換，圍食膜使微生物與上皮細胞不會直接接觸；後腸為大部分微生物菌群定殖處；昆蟲的馬式管 (Malpighian tubules)，位於中後腸的交界處，為後腸前端的延伸，延伸至體腔中吸收廢物。後腸含有含氮廢物及食物代謝物，為腸道共生菌創造生存環境，有一些昆蟲的後腸也有吸收養分的功能，例如：某些蟑螂的後腸壁包含細胞間通道，營養物質，包括共生菌產生的脂肪酸和胺基酸，可從後腸腔送至血淋巴 (Cruden & Markovetz 1987; Zurek & Keddie 1996)。昆蟲的共生微生物甚至可以透過卵殼或雌蟲分泌於卵上的物質進行垂直傳播 (Engel & Moran 2013)。昆蟲的前腸和後腸會隨著蛻皮一同脫落，而中腸的圍食膜更換會使所包含之物質被清除，因此有研究團隊透過蚊子發育時的腸道微生物定殖狀況，發現蛻皮會導致腸道細菌幾乎完全被清除 (Moll *et al.* 2001)。有一些昆蟲演化出可幫助微生物持續存在腸道中的空間 (crypts or paunches)，例如：某些植食性的異翅亞目昆蟲在中腸有特化的隱窩、高等白蟻於後腸分為兩腔室，前端為特化的發酵區等(Engel & Moran 2013)。

據統計，昆蟲腸道含有的微生物是昆蟲總細胞的 10 倍，微生物基因是動物基因的 100 倍 (Rajagopal 2009)。微生物於環境中透過食物、糞便或卵殼進入消化道定殖於昆蟲腸道，並在消化和新陳代謝中發揮重要作用，目前已知其中一些共生菌對宿主為有益的益生菌，例如: 白蟻腸道中的微生物可以幫助分解纖維素 (Breznak 2000; Noda *et al.* 2018)，並代謝產生醋酸、二氧化碳及氫氣，可供白蟻作為能量來源使用，還可幫助固氮作用 (Lilburn *et al.* 2001)；蟑螂為雜食性的昆蟲，其腸道菌相可隨著攝食不同食物而改變，幫助其代謝不同的食物(Jahnes & Sabree 2020)，且若是移除其腸道菌，會造成其高死亡率、生長緩慢、繁殖能力下降 (Brooks & Richards 1955)；黑水虻的幼蟲可透過腸道菌將有機廢棄物轉化為高價值的生物質 (biomass)，而其腸道微生物可以幫助轉化更多營養物質或更容易吸收養分，使其體重及蛹長增加 (Callegari, Jucker *et al.* 2020)，證實共生菌幫助黑水虻；中華瘧蚊 (*Anopheles sinensis*) 腸道中分離到黏質沙雷氏桿菌 (*Serratia marcescens* Y1)，發現可以透過調控中腸基因增強免疫反應，幫助其宿主抵抗瘧原蟲感染 (Bai, Wang *et al.* 2019)；黑斑土椿象 (*Parastrachia japonensis*) 為亞社會性昆蟲，其若蟲食性專一，需透過雌蟲帶回青皮木 (*Shoepfia jasminodora*) 的核果餵食，此種植物結果期僅於 6 月的 2 個星期，因此黑斑土椿象成蟲後便進入冬眠期，可長達 8-20 個月，冬眠期間他們透過腸道共生菌進行尿酸回收利用，作為合成胺基酸的原料，若是將共生菌移除，其體內胺基酸含量便明顯降低，其共生菌中含有合成硫胺素和類胡蘿蔔素的基因組，表示其可能具有幫助宿主抗氧化和避免 DNA 損傷功能 (Mondal *et al.* 2020)。

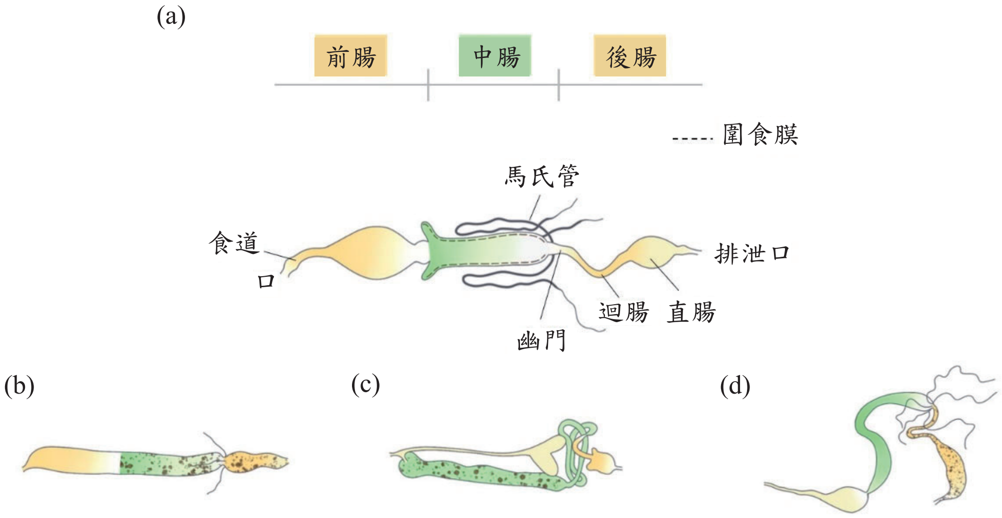


圖 1. 不同昆蟲之腸道示意圖。(a) 昆蟲典型之腸道結構：前腸、中腸及後腸；中腸有圍食膜 (虛線)，(b) 鱗翅目：幼蟲，(c) 雙翅目：果蠅，(d) 膜翅目：蜜蜂。黑色點為腸道菌分布位置。(引用並修改自 Engel & Moran 2013)

Fig. 1. Schematic diagram of the intestines of different insects. (a) typical insect intestinal structure: foregut, midgut and hindgut; midgut has peritrophic membrane (dashed line), (b) Lepidoptera: larva, (c) Diptera: Drosophila, (d) Hymenoptera: bees. The black dots are the distribution locations of intestinal bacteria. (Adapted from Engel & Moran 2013).

昆蟲微生物研究- 雙翅目、半翅目、蜜蜂

(一)雙翅目昆蟲

雙翅目昆蟲中，果蠅、蚊子、家蠅由於與人類生活範圍接近、頻繁觸及，經常成為許多學門的研究對象，而這些昆蟲的微生物共生菌群，也引起了部分學者的深入探討。腸道共生菌影響雙翅目昆蟲的行為及生理的例子相當多，其中較為有名的例子為兩種共生菌 (*Acetobacter pomorum*, AP) 及 (*Lactobacillus plantarum*, LP) 對黑腹果蠅繁殖行為的影響 (Erkosar *et al.* 2013; Morimoto *et al.* 2017)。AP 和 LP 兩種共生菌為黑腹果蠅腸道內常見的共生菌種，對於果蠅在各發育階段的生長皆具有非常顯著的效益，例如：LP 藉由調節激素合成路徑上的 TOR pathway，以影響宿主蛻皮激素表達量，可幫助黑腹果蠅幼蟲度過營養不足的逆境，亦可以調控宿主對胺基酸的食慾，直接提升果蠅的生理健康 (Shin *et al.* 2011; Storelli *et al.* 2011; Leitão-Gonçalves *et al.* 2017)。然而最為特別的是 AP 和 LP 對果蠅的交配偏好及後代影響，過往文獻指出，果蠅會偏好與腸道共生菌組成較接近的個體交配 (Erkosar *et al.* 2013)，並且有 LP 共生的雄性較 AP 共生的雄性能交配更長的時間 (Morimoto *et al.* 2017)，同時，與 LP 共生雄性交配後的雌性，在產生後代的數量上也較多；另外，皆具

AP 共生的雌雄果蠅，在交配後所產生的後代雌性個體體重會明顯較低，即為生理表現較差。這些共生菌種導致果蠅繁殖利益上的差距，也使得研究果蠅的學者，在人工飼料上需將飼料所含菌種列為重要的參考條件。

在蚊子的共生菌案例中， *Asaia* 屬的細菌在蚊子體內共生的比例非常高，在腸道、唾腺以及雌性的生殖系統，比例分別為 41%、25%以及 20%，顯著的比例加上特殊的分布位置(唾腺及性腺)，使此屬菌對蚊子的生理影響以及拮抗瘧原蟲的能力上受到學界許多關注 (Favia *et al.* 2007)。此菌已被證實可透過影響蚊子免疫及營養相關基因的表達而延長蚊子各生活史之存活率、壽命和幼蟲之化蛹成功率 (Mancini *et al.* 2020)。另外，研究發現該菌可刺激瘧蚊免疫基因，提升主要控制蟲體中腸上皮細胞之瘧原蟲囊體數量的 *TEP1* 及 *LRIM1* 基因，以及負責蟲體內微生物群平衡的 C 型凝集素基因 *CTL4* 的表達，從而抗瘧原蟲 (Bassene *et al.* 2019; Cappelli *et al.* 2019)。

家蠅的腸道菌群隨著不同成長階段而有顯著的差別。卵期具有相當高多樣性的菌種，這些菌群被推測應可以提供剛孵化的幼蟲初階的養分，並減少營養不足所可能導致的同類相食 (Lam *et al.* 2009)；在幼蟲期間，腸道菌群的組成多樣性會隨著齡期而增加，剛孵化的 1 齡幼蟲，腸道菌群 99%以上皆為 Weissella 屬菌，而發育至 2 齡幼蟲時，菌群中 *Stenotrophomonas* 屬, *Bacillus* 屬和 *Lactococcus* 屬菌的比例會明顯上升，*Ochrobactrum* 屬、*Pseudochrobactrum* 屬和 *Paenochrobactrum* 屬等紅螺菌目以及 *Lactococcus* 屬等醋酸菌的菌種則會開始出現於 3 齡幼蟲期間。在整個幼蟲成長至成蟲的過程，被偵測出的 OTUs 量從 1 齡幼蟲的 40 至成蟲的 200 單位，2 齡幼蟲後的腸道菌群組成會隨時間有較大的改變，而不同世代成蟲間腸道菌群的組成也相當不同。目前推測這些齡期內以及齡期間的共生菌種差異，來自於兩個方面。不同世代間成蟲菌群的差別被認為與成蟲獲得營養的媒介有相當大的關聯，包括成蟲的生長環境、食物來源以及經常接觸的家畜種類不同 (Zhao *et al.* 2017; de Jonge *et al.* 2020)。幼蟲至蛹期間的菌群則與營養代謝途徑的明顯改變有關，隨著齡期的增長，碳水化合物代謝相關基因的表達會愈加明顯，而蛹期的胺基酸代謝則會比幼蟲期高出許多 (de Jonge *et al.* 2020)。這些代謝需求以及個體發育上的改變，與宿主體內的共生菌群變化趨勢相關，雖然其中細部的機制仍未被深入探討，但已足夠做為共生菌群對家蠅生長影響的間接證據。

在上述的 3 種雙翅目昆蟲及其共生菌的案例中，可以發現微生物共生菌群對宿主的影響層面極廣。於基因層面，共生菌的參與影響了許多宿主基本代謝以及免疫相關基因的表達 (Grogan *et al.* 2021)；於生長及發育方面，微生物在昆蟲體內幫助食物的代謝進行，提升了宿主的存活率，影響範圍甚至可擴展到生活史的長短 (Grogan *et al.* 2021)；於行為方面，黑腹果蠅共生菌造成其繁殖行為的偏好外，也會刺激果蠅的取食 (Grogan *et al.* 2021)。共生菌群在雙翅目昆蟲的研究，直接證明了這些昆蟲的存活、行為、繁殖等多方面，不僅與其本身相關，亦須考量到在其體內的微生物所可能帶來的利益或是影響，而對於我們人類而言，這些研究更可以提供我們在應用上不同的想法，例如以基因轉殖的手段，將帶有可表達抗瘧原蟲基因的質體植入瘧蚊共生菌 *Asaia* 屬中，藉由其於蚊子體內大量的複製來達到殺死瘧原蟲的效果 (Grogan *et al.* 2021)。這些學術及應用上的高價值，使得微生物共生菌群在雙翅目昆蟲的研究上不得忽視。

(二)半翅目昆蟲

半翅目 (Hemiptera) 的昆蟲包含植食性椿象、蚜蟲，或具有傳播植物病原細菌、病毒能力的粉蝨、葉蟬等重要農業經濟害蟲。部分植食性半翅目昆蟲具有懷菌細胞如蚜蟲、粉蝨和葉蟬，可與特定共生菌行專性共生 (obligate symbiosis)，其提供宿主必需胺基酸或維生素；然植食性椿象大多缺乏懷菌細胞，其專性共生菌多存在中腸的後半部。椿象的專性共生菌經由卵巢以多種形式進行垂直傳播，如：紅椿象

(*Pyrrhocoris apterus*) 的專性共生菌 *Coriobacterium glomerans* 會附著於卵表面；若蟲孵化時，藉由接觸卵表面而獲得共生菌 (Kaltenpoth, *et al.* 2009)；而在椿象科 (pentatomid) 的雌成蟲的中腸後部具有數個隱窩 (crypt)，稻綠椿象 (*Nezara viridula*) 雌成蟲即可從隱窩中釋放出其共生菌於中腸中，再藉由排泄作用使共生菌由肛門轉移至卵表面進行水平傳播 (Prado *et al.* 2006)；龜蝽科 (plataspid) 的 *Megacopta punctatissima* 會於產卵時排出含有共生菌的囊狀構造 (symbiont capsules)，待若蟲孵化後會藉由取食膠囊獲取共生菌 (Fukatsu & Hosokawa 2002)；另一種特別的垂直傳播方式則是透過凝膠狀的介質，異尾椿科 (Urostylididae) 椿象的共生菌 *Candidatus Tachikawaea* gelatinosa 透過凝膠狀的介質附著於卵殼上，初孵化的若蟲藉由取食膠狀物同時獲得共生菌與必需胺基酸 (Kaiwa *et al.* 2014)。共生菌於族群中的水平傳播也在特定椿象中被發現，如：*Burkholderi*a 主要儲藏於中腸的隱窩中，仰賴宿主以水平傳播進入中腸中 (Kikuchi & Yumoto 2013)。

植食性椿象因為宿主食性單一，多和特定共生菌形成互利共生關係，腸道共生菌提供營養方面的功能，如：龜蝽科 (plataspid) 的 *M. punctatissima* 椿象和其專一性腸道共生菌 *Ishikawaella* spp. 的相關研究中，移除共生菌會使若蟲發育速度下降和死亡率提高，證實 *Ishikawaella* spp.合成宿主食物中缺乏的必需胺基酸和維生素 (Nikoh *et al.* 2011)；而褐翅椿象 (*Halyomorpha halys*) 其體內共生菌 *Pantoea carbekii* 可以提供宿主必需胺基酸和維生素，使其可以適應許多不同寄主作物 (Kenyon *et al.* 2015)。除了常見的營養方面的功能，共生菌在椿象體內也提供其他方面的功能，例如：存在於點蜂緣蝽 (*Riptortus pedestris*) 中腸後部的 *Burkholderia* 具有降解殺蟲劑的功能 (Kikuchi *et al.* 2012)，同時存在雌成蟲體內的 *Burkholderia* 也會提升椿象體內特定的青春激素 juvenile hormone)，具有調節雌蟲產卵的重要功能 (Lee *et al.* 2019)。

(三)蜜蜂

蜜蜂 (*Apis mellifera*) 於自然生態上扮演重要的授粉角色。牠不但是農業上最重要的幫手，對全球農作物的產值貢獻高達 2000 億美金以上 (Gallai *et al.* 2009)，而其產物如蜂蜜、蜂王乳與蜂膠等也常被用於我們日常生活中。但由於氣候、環境變遷劇烈導致蜂群健康受到挑戰，許多策略，例如：優化環境，減少農藥使用、增加多樣性蜜粉源植物、開發高營養蜂糧，以及腸道菌開發等被應用於改善蜂群健康。

環境中的花蜜、花粉和水為蜜蜂獲取腸道微生物菌相的來源，腸道微生物可以影響蜜蜂營養、免疫等基因的表達；以及營養物質的吸收。蜜蜂腸道以昆蟲腸道前、中、後腸來定義，這三個部分皆有菌落的分佈，前腸是蜜囊，用於儲蜜，因此該部位菌落是依環境蜜源微生物而有所變化，所以菌種與菌數量變化很大；至於中腸與後腸之菌種數高達兩萬種，且擁有10^8以上的菌落(Rangberg *et al.* 2012; Katsnelson 2015; Moran 2015)。美國德州大學Moran研究團隊利用次世代定序分析 (next generation sequencing, NGS) 解析蜜蜂腸道菌落組成，最常見的細菌種類有乳酸菌、醋酸菌、桿菌與鏈黴菌，以及兩種常見於蜜蜂腸道之厭氧菌*Snodgrassella alvi* 和*Gilliamella apicola*等，它們所扮演的角色功能眾多 (Kwong & Moran 2016; Anderson & Ricigliano 2017; Bonilla-Rosso & Engel 2018)，例如：可以幫助蜜蜂消化，增加體重 (Zheng *et al.* 2017)、轉化有毒糖類 (Zheng *et al.* 2016)，提升宿主免疫力 (Kwong *et al.* 2017)等；就目前最新的蜜蜂腸道菌相研究可知花粉到中後腸時，花粉上的糖與細胞壁成份 (pectin) 會被細菌 *G. apicola*所代謝，經代謝所形成的有機酸則可再被吸附於腸道的細菌*Snodgrassella alvi*再次代謝，最後剩餘的花粉粒到後腸末端時，則由乳酸菌屬的菌進行代謝分解 (Bonilla-Rosso & Engel 2018) (圖2)。

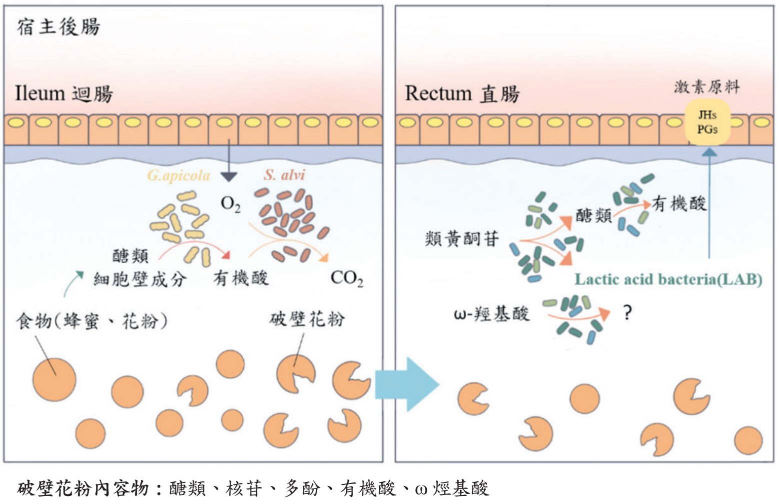


圖2. 蜜蜂腸道之微生物菌相活動，引用自Bonilla-Rosso & Engel 2018。

Fig. 2. Microbial activity in the intestines of bees. Adapted from Bonilla-Rosso & Engel, 2018.

蜜蜂食物中含有多種醣類，其中如：阿拉伯糖(arabinose)、木糖 (xylose)、半乳糖 (galactose)、甘露糖 (mannose)、蜜二糖 (melibiose) 和棉籽糖(raffinose) 等，蜜蜂無法將其代謝 (Barker & Lehner 1974)，而其腸道菌如：*G. apicola*、*F. perrara*、*Lactobacillus* Firm-4、*Lactobacillus* Firm-5 及 *B. asteroides*等可協助蜜蜂代謝 (Kwong & Moran 2016)。透過某些乳酸菌菌種的全基因解序，可發現該類菌有許多參與糖攝取的磷酸轉移酶系統的基因組(Ellegaard *et al.* 2015; Kwong *et al.* 2014)；*B. asteroides* 和 *Lactobacillus* Firm-5 具有用於合成和利用海藻糖的基因組，海藻糖為昆蟲用於能量儲存的醣類。*Bifidobacterium* spp.及*Lactobacillus* spp. 通常具有蜜蜂缺乏的負責糖合成和降解的基因(Ellegaard *et al.* 2015)。

除了營養代謝之外，越來越多研究也發現腸道細菌可以抑制病菌--病毒、細菌、真菌等的生長，例如：美國Dr. Jay Evans研究團隊發現*S. alvi* 可藉由促進蜜蜂免疫系統達到有效抑制病毒增生 (Katsnelson 2015)；阿根廷研究團隊發現蜜蜂腸道中的*Bacillus subtilis*可以有效抑制美洲幼蟲病病原菌的生長(Sabate *et al.* 2009)；美國Dr. Vanessa Corby-Harris研究室發現*P. apium*可以有效抵抗微粒子病(Corby-Harris *et al.* 2016)；沙烏地阿拉伯研究團隊發現*B. subtilis*與一個螢光假單胞菌 (*Pseudomonas fluorescence*) 可有效抑制白堊病的發生(Omar *et al.* 2014)。

我們在4年前也開始投入本土西方蜂、熊蜂腸道菌的篩選和特性探討，已獲得數株具有開發潛力菌種，本報告以腸膜明串珠菌 (*Leuconostoc mesenteroides*) 進行簡略介紹。該菌已被美國FDA認為是一般公認安全 (generally recognized as safe, GRAS) 的菌株，也被歐盟列在最新的安全資格認定(gualified presumption of safety, QPS) 列表中，且臺灣行政院農業委員會亦公告該菌「可用於供給家畜、家禽、水產動物之飼料添加物中」。我們所分離的該株菌具有很好的耐糖滲透壓 (50% sucrose solution) 、耐酸 (pH5.0)、可代謝多種醣類，其中還包含對蜜蜂

有毒的醣類，如：阿拉伯糖、木糖、半乳糖、甘露糖、蜜二糖和棉籽糖等、產多種有機酸，例如：蘋果酸 (malic acid)、乳酸 (lactic acid)、醋酸 (acetic acid) 和檸檬酸 (citric acid) 等、產胞外多醣體 (exopolysaccharide, EPS)、抑制病原菌美洲幼蟲病原，以及發酵液經蜜蜂取食後，可刺激蜜蜂之營養和免疫基因表達；此外，該菌經冷凍乾燥後，菌粉仍有高活菌數；藉此菌粉添加入糖水中，餵食蜂群，發現該菌可於一天內擴散至每一個蜂個體，且腸道菌數於5天內可維持在10^8以上，而以總菌量來看，總量菌變化幅度不大，該研究成果已投稿，正審查中 (Huang *et al.* 2021)。根據英國蜜蜂研究團隊分析健康蜂群和不健康蜂群之腸道菌菌相組成，發現健康蜂群腸道菌相有高比例*Leuconostoc*屬的菌，因此他們推測該屬的菌可做為蜂群健康指標 (Budge *et al.* 2016)。我們也因此對於*L. mesenteroides*作為蜜蜂益生菌極具信心。

展望

昆蟲微生物的研究日漸受到重視，除了了解昆蟲腸道及體腔之菌相組成外，其共生機制及對昆蟲生理及行為的影響都是熱門的研究方向，甚至亦有些微生物應用正在進行，例如：昆蟲病原菌開發成防治害蟲之生物製劑、添加益生菌於食物中，促進授粉昆蟲健康等。鑒於高多樣性的昆蟲微生物種類和功能，實有必要投入更多資源挖掘此天然微生物寶庫，該昆蟲微生物應用範圍除了害蟲防治 (降低農藥使用)、促進經濟昆蟲飼養健康，尚可應用到分解廢棄物、食品處理等領域，可進一步降低化學處理所帶來的環境副作用，而達到與符合目前全球追求的綠色永續循環經濟目標。

參考文獻

Anderson, K. E. and V. A. Ricigliano. 2017. Honey bee gut dysbiosis: a novel context of disease ecology. Curr. Opin. Insect Sci. 22: 125-132.

Bai, L., L. Wang, J. Vega-Rodríguez, G. Wang, and S. J. F. i. m. Wang. 2019. A gut symbiotic bacterium *Serratia marcescens* renders mosquito resistance to Plasmodium infection through activation of mosquito immune responses. Front. Microbiol. 10: 1580-1591.

Barker, R. J. and Y. Lehner. 1974. Acceptance and sustenance value of naturally occurring sugars fed to newly emerged adult workers of honey bees (*Apis mellifera* L.). J. Exp. Zool. 187: 277-285.

Bassene, H., E. H. A. Niang, F. Fenollar, S. Doucoure, B. Samb, O. Faye, D. Raoult, C. Sokhna, and O. Mediannikov. 2019. A pilot study on isolation of *Asaia* and detecting its co-presence with *Plasmodium falciparum* in two major malaria vectors in Senegal. J. Parasitol. Vector Biol. 11: 1-9.

Beemelmanns, C., H. Guo, M. Rischer, and M. Poulsen. 2016. Natural products from microbes associated with insects. Beilstein J. Org. Chem. 12: 314-327.

Berasategui, A., S. Shukla, H. Salem, and M. Kaltenpoth. 2016. Potential applications of insect symbionts in biotechnology. Appl. Microbiol. Biotechnol. 100: 1567-1577.

Boleij, A. and H. Tjalsma. 2012. Gut bacteria in health and disease: a survey on the interface between intestinal microbiology and colorectal cancer. Biol. Rev. Camb. Philos. Soc. 87: 701-730.

Bonilla-Rosso, G. and P. Engel. 2018. Functional roles and metabolic niches in the honey bee gut microbiota. Curr. Opin. Microbiol. 43: 69-76.

Breznak, J. A. 2000. Ecology of prokaryotic

microbes in the guts of wood-and litter-feeding termites. Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology, Springer: 209-231.

Brooks, M. A. and A. G. Richards. 1955. Intracellular symbiosis in cockroaches. I. Production of aposymbiotic cockroaches. Biol. Bull. 109: 22-39.

Budge, G. E., I. Adams, R. Thwaites, S. Pietravalle, G. C. Drew, G. D. D. Hurst, V. Tomkies, N. Boonham, and M. Brown. 2016. Identifying bacterial predictors of honey bee health. J. Invertebr. Pathol. 141: 41-44.

Callegari, M., C. Jucker, M. Fusi, M. G. Leonardi, D. Daffonchio, S. Borin, S. Savoldelli, and E. Crotti. 2020. Hydrolytic profile of the culturable gut bacterial community associated with *Hermetia illucens*. Front. Microbiol. 11: 1965-1978.

Cappelli, A., C. Damiani, M. V. Mancini, M. Valzano, P. Rossi, A. Serrao, I. Ricci, and G. Favia. 2019. Asaia activates immune genes in mosquito eliciting an anti-Plasmodium response: implications in malaria control. Front. Genet. 10: 836-847.

Corby-Harris, V., L. Snyder, C. A. Meador, R. Naldo, B. Mott, and K. E. Anderson. 2016. *Parasaccharibacter apium*, gen. nov., sp. nov., improves honey bee (Hymenoptera: Apidae) Resistance to Nosema. J. Econ. Entomol. 109: 1-12.

Cruden, D. and A. Markovetz. 1987. Microbial ecology of the cockroach gut. Annu. Rev. Microbiol. 41: 617-643.

de Jonge, N., T. Y. Michaelsen, R. Ejbye-Ernst, A. Jensen, M. E. Nielsen, S. Bahrndorff, and J. L. Nielsen. 2020. Housefly (*Musca domestica* L.) associated microbiota across different life stages. Sci. Rep. 10: 7842-7851.

Douglas, A. E. 2014. The molecular basis of bacterial–insect symbiosis. J. Mol. Biol. 426: 3830-3837.

Engel, P. and N. A. Moran. 2013. The gut microbiota of insects - diversity in structure and function. FEMS Microbiol. Rev. 37: 699-735.

Erkosar, B., G. Storelli, A. Defaye, and F. Leulier. 2013. Host-intestinal microbiota mutualism: "learning on the fly". Cell host & microbe 13: 8-14.

Favia, G., I. Ricci, C. Damiani, N. Raddadi, E. Crotti, M. Marzorati, A. Rizzi, R. Urso, L. Brusetti, and S. Borin. 2007. Bacteria of the genus Asaia stably associate with Anopheles stephensi, an Asian malarial mosquito vector. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 104: 9047-9051.

Fukatsu, T. and T. Hosokawa. 2002. Capsule-transmitted gut symbiotic bacterium of the Japanese common plataspid stinkbug, *Megacopta punctatissima*. Appl. Environ. Microbiol. 68: 389-396.

Gallai, N., J. M. Salles, J. Settele, and B. E. Vaissière. 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. Ecol. Econ. 68: 810-821.

Grogan, C., M. Bennett, S. Moore, and D. Lampe. 2021. Novel *Asaia bogorensis* Signal Sequences for Plasmodium Inhibition in *Anopheles stephensi*. Front. Microbiol. 12: 633667-633681.

Huang, Y. H., Y. H. Chen, P. S. Hsu, T. H. Wu, C. F. Lin, and M. C. Wu. 2021. *Leuconostoc mesenteroides*, a potential probiotics for

honey bee, *Apis mellifera*. Scientific report submitted.

Jahnes, B. C. and Z. L. Sabree. 2020. Nutritional symbiosis and ecology of host-gut microbe systems in the Blattodea. Curr. Opin. Insect. Sci. 39: 35-41.

Jing, T. Z., F. H. Qi, and Z. Y. Wang. 2020. Most dominant roles of insect gut bacteria: digestion, detoxification, or essential nutrient provision? Microbiome 8: 38-58.

Jung, J., A. Heo, Y. W. Park, Y. J. Kim, H. Koh, and W. Park. 2014. Gut microbiota of *Tenebrio molitor* and their response to environmental change. J. Microbiol. Biotechnol. 24: 888-897.

Kaiwa, N., T. Hosokawa, N. Nikoh, M. Tanahashi, M. Moriyama, X. Y. Meng, T. Maeda, K. Yamaguchi, S. Shigenobu, and M. Ito. 2014. Symbiont-supplemented maternal investment underpinning host' s ecological adaptation. Curr. Biol. 24: 2465-2470.

Kaltenpoth, M., S. A. Winter, and A. Kleinhammer. 2009. Localization and transmission route of *Coriobacterium glomerans*, the endosymbiont of pyrrhocorid bugs. FEMS Microbiol. Ecol. 69: 373-383.

Katsnelson, A. 2015. Microbiome: The puzzle in a bee's gut. Nature 521: S56-S56.

Kenyon, L. J., T. Meulia, Z. L. Sabree, and evolution. 2015. Habitat visualization and genomic analysis of "Candidatus Pantoea carbekii," the primary symbiont of the brown marmorated stink bug. Genome Biol. 7: 620-635.

Kikuchi, Y., M. Hayatsu, T. Hosokawa, A. Nagayama, K. Tago, and T. Fukatsu. 2012. Symbiont-mediated insecticide resistance. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 109: 8618-8622.

Kikuchi, Y. and I. Yumoto. 2013. Efficient colonization of the bean bug Riptortus pedestris by an environmentally transmitted Burkholderia symbiont. Appl. Environ. Microbiol. 79: 2088-2091.

Klammsteiner, T., A. Walter, T. Bogataj, C. D. Heussler, B. Stres, F. M. Steiner, B. C. Schlick-Steiner, W. Arthofer, and H. Insam. 2020. The core gut microbiome of black soldier fly (*Hermetia Illucens*) larvae raised on low-bioburden diets. Front. Microbiol. 11: 1-14.

Kwong, W. K., A. L. Mancenido, and N. A. Moran. 2017. Immune system stimulation by the native gut microbiota of honey bees. R. Soc. Open Sci. 4: 170003-170011.

Kwong, W. K. and N. A. Moran. 2016. Gut microbial communities of social bees. Nat. Rev. Microbiol. 14: 374-384.

Lam, K., C. Geisreiter, and G. Gries. 2009. Ovipositing female house flies provision offspring larvae with bacterial food. Entomol. Exp. Appl. 133: 292-295.

Lee, J., C. H. Kim, H. Am Jang, J. K. Kim, T. Kotaki, T. Shinoda, T. Shinada, J. W. Yoo, and B. L. Lee. 2019. Burkholderia gut symbiont modulates titer of specific juvenile hormone in the bean bug *Riptortus pedestris*. Dev. Comp. Immunol. 99: 103399-103405.

Leitão-Gonçalves, R., Z. Carvalho-Santos, A. P. Francisco, G. T. Fioreze, M. Anjos, C. Baltazar, A. P. Elias, P. M. Itskov, M. D. Piper, and C. Ribeiro. 2017. Commensal bacteria and essential amino acids control food choice behavior and reproduction. PLoS Biol. 15: e2000862-e2000891.

Lilburn, T., K. Kim, N. Ostrom, K. Byzek, J. Leadbetter, and J. Breznak. 2001. Nitrogen fixation by symbiotic and free-living spirochetes. Science 292: 2495-2498.

Mancini, M. V., C. Damiani, S. M. Short, A. Cappelli, U. Ulissi, A. Capone, A. Serrao, P. Rossi, A. Amici, and C. Kalogris. 2020. Inhibition of Asaia in adult mosquitoes causes male-specific mortality and diverse transcriptome changes. Pathogens 9: 380-390.

Moll, R. M., W. S. Romoser, M. C. Modrakowski, A. C. Moncayo, and K. Lerdthusnee. 2001. Meconial peritrophic membranes and the fate of midgut bacteria during mosquito (Diptera: Culicidae) metamorphosis. J. Med. Entomol. 38: 29-32.

Mondal, S. I., A. Akter, R. Koga, T. Hosokawa, M. Dayi, K. Murase, R. Tanaka, S. Shigenobu, T. Fukatsu, and T. Kikuchi. 2020. Reduced genome of the gut symbiotic bacterium "Candidatus Benitsuchiphilus tojoi" provides insight into its possible roles in ecology and adaptation of the host insect. Front. Microbiol. 11: 840-855.

Moran, N. A. 2015. Genomics of the honey bee microbiome. Curr. Opin. Insect Sci. 10: 22-28.

Morimoto, J., S. J. Simpson, and F. Ponton. 2017. Direct and trans-generational effects of male and female gut microbiota in *Drosophila melanogaster*. Biol. Lett. 13: 20160966-20160971.

Nikoh, N., T. Hosokawa, K. Oshima, M. Hattori, and T. Fukatsu. 2011. Reductive evolution of bacterial genome in insect gut environment. Genome Biol. Evol. 3: 702-714.

Noda, S., D. Shimizu, M. Yuki, O. Kitade, and M. Ohkuma 2018. Host-symbiont cospeciation of termite-gut cellulolytic protists of the genera Teranympha and Eucomonympha and their Treponema endosymbionts. Microbes Environ.: ME17096-ME17104.

Omar, M. O. M., A. M. Moustafa, M. J. Ansari, A. M. Anwar, B. F. Fahmy, A. Al-Ghamdi, and A. Nuru. 2014. Antagonistic effect of gut bacteria in the hybrid carniolan honey bee, *Apis mellifera* Carnica, against *Ascosphaera apis*, the causal organism of chalkbrood disease. J. Apic. Sci. 58: 17-27.

Park, R., M. C. Dzialo, S. Spaepen, D. Nsabimana, K. Gielens, H. Devriese, S. Crauwels, R. Y. Tito, J. Raes, B. Lievens, and K. J. Verstrepen. 2019. Microbial communities of the house fly *Musca domestica* vary with geographical location and habitat. Microbiome 7: 147-159.

Prado, S. S., D. Rubinoff, and R. P. Almeida. 2006. Vertical transmission of a pentatomid caeca-associated symbiont. Ann. Entomol. Soc. Am. 99: 577-585.

Rajagopal, R. 2009. Beneficial interactions between insects and gut bacteria. Indian J. Microbiol. 49: 114-119.

Rangberg, A., D. B. Diep, K. Rudi, and G. V. Amdam. 2012. Paratransgenesis: an approach to improve colony health and molecular insight in honey bees (*Apis mellifera*)? Integr. Comp. Biol. 52: 89-99.

Sabate, D. C., L. Carrillo, and M. C. Audisio. 2009. Inhibition of *Paenibacillus larvae* and *Ascosphaera apis* by *Bacillus subtilis* isolated from honeybee gut and honey samples. Res. Microbiol. 160: 193-199.

Sampaio-Maia, B., L. Simões-Silva, M. Pestana, R. Araujo, and I. Soares-Silva. 2016. The role of the gut microbiome on chronic kidney disease. Adv. Appl. Microbiol. 96: 65-94.

Shan, H., W. Wu, Z. Sun, J. Chen, and H. Li. 2021. The gut microbiota of the insect infraorder pentatomomorpha (Hemiptera: Heteroptera) for the light of ecology and evolution. Microorganisms 9: 464-480.

Sherwin, E., T. G. Dinan, and J. F. Cryan. 2018. Recent developments in understanding the role of the gut microbiota in brain health and disease. Ann. N. Y. Acad. Sci. 1420: 5-25.

Shin, S. C., S. H. Kim, H. You, B. Kim, A. C. Kim, K. A. Lee, J. H. Yoon, J. H. Ryu, and W. J. Lee. 2011. Drosophila microbiome modulates host developmental and metabolic homeostasis via insulin signaling. Science 334: 670-674.

Smith, C. C., R. B. Srygley, F. Healy, K. Swaminath and U. G. Mueller. 2017. Spatial structure of the mormon cricket gut microbiome and its predicted contribution to nutrition and immune function. Front. Microbiol. 8: 1-15.

Storelli, G., A. Defaye, B. Erkosar, P. Hols, J. Royet, and F. Leulier. 2011. *Lactobacillus plantarum* promotes Drosophila systemic growth by modulating hormonal signals through TOR-dependent nutrient sensing. Cell Metab. 14: 403-414.

Zhao, Y., W. Wang, F. Zhu, X. Wang, X. Wang, and C. Lei. 2017. The gut microbiota in larvae of the housefly *Musca domestica* and their horizontal transfer through feeding. AMB Express 7: 147-147.

Zheng, H., A. Nishida, W. K. Kwong, H. Koch, P. Engel, M. I. Steele, and N. A. Moran. 2016. Metabolism of toxic sugars by strains of the bee gut symbiont *Gilliamella apicola*. MBio 7: e01326-e01334.

Zurek, L. and B. A. Keddie. 1996. Contribution of the colon and colonie bacterial flora to metabolism and development of the american cockroach *Periplaneta americana* L. J. Insect Physiol. 42: 743-748.

Research Progress of Microorganisms in Insects

Yu-Hsin Chen[1], Yi-Ting Hung[1], Wei-Jyun Ma[1], and Ming-Cheng Wu[1,*]

[1] Department of Entomology, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, ROC.

Abstract

Insects have rich microbial resources. These microbes from insects can help the host decompose food, degrade compounds from the environment, synthesize some essential nutrients or resist pathogens, and have a wide range of potential applications. Many studies have confirmed that the microorganisms in the intestinal tract of insects can indirectly or directly affect the health of the host. The researches in our laboratory mainly focus on biology of bees, including honey bees, bumble bees and stingless bees, in which the intestinal microbes of bees are isolated and the physiological effects of microbes on bees are analyzed. One of the isolated bacteria, named *Leuconostoc mesenteroides* isolated from the gut of bumble bee was introduced and shown the characteristics of *L. mesenteroides*, the effect of its fermentation broth on gene expression of bees and the spread of the bacteria in the colony in this article. Additionally, we also introduced the microbial researches from insects of Diptera and Hemiptera.

Keywords: Microbes, Diptera, Hemiptera, Bees.

*Corresponding author.
E -mail: mcwu12@gmail.com

功能性植生素於飼料產業的研發與應用

楊詠嵐 [1] 郭恬岎 [1] 鐘仁甫 [1] 李懿珊 [1] 林娟如 [1] 梁佑全 [1] 林彣郁 [1] 楊文欽 [1,2,3,*]

[1] 中央研究院農業生物科技研究中心。台灣 台北市。

[2] 中央研究院草藥科技研究專題中心。台灣 台北市。

[3] 中央研究院生醫轉譯研究中心。台灣 台北市。

摘要

植生素為含單一或多種植物化合物，可以用於防治動物的疾病或提升動物健康、生長效能或生殖效能。它可以開發成為動物用藥或飼料添加物，用於動物或其飼料和飲水中。植生素正成為畜牧業的抗生素取代物質之一。植生素目前約用於 5%飼料中，每年產值約 10 億美元，有 20 倍成長空間。本文回顧與討論植生素現況、產業潛力、研發和應用，包括目前市場植生素種類和特性、防治疾病的功效和機制、植生素的優缺點及在無抗養殖的運用等。

關鍵詞：植生素、飼料添加物、抗生素替代物質、無抗養殖、動物健康。

前言

全球畜牧業年產值達 1.5 兆美元，飼料產值 4300 億美元 (郭等 2021)。單種經濟動物和水產動物密集養殖，可提升生產效率，供應人類大量蛋白質食物，解決部分糧食安全問題。但飼養密度過高，易增加感染風險，造成經濟損失。畜牧業者從 1940 年起，於經濟動物的飼料中使用低劑量抗生素，發現可以控制傳染疾病並增加生長效能，抗生素預防性添加成為畜牧業的主流。然而，不當使用抗生素也造成抗生素殘留和抗藥性細菌，造成食品安全和公衛問題。國內外許多報告皆指出畜牧場普遍存在高比例抗藥性病原菌和抗藥性，更嚴重的是這些抗藥性病原菌及抗藥性會透過動物傳染給人，再經由人傳人放大，形成公衛和健康問題。2008 年，世界動物健康組織 (World Organisation for Animal Health, OIE) 提出的大健康 (One Health) 概念，人類健康和環境健康及動物健康互為一體，相互影響。抗生素在畜牧上的使用不當，2000 年起發現超級細菌產生和抗藥性傳播，衝擊動物和人類健康。自 2006 年起歐盟禁止抗生素作為飼料添加藥物，先進國家開始限制抗生素預防性添加，密集養殖的畜牧業面臨傳染病的風險和經濟損失。

未來養殖新趨勢著重於食物安全 (禁用化學抗生素) 和友善環境 (以減量排放/再利用/再循環為依歸)。因此，在畜牧業使用抗生素替代物質以取代抗生素已成世界趨勢。目前有 8 大類抗生素替代物質，包括益生菌、益生質、有機酸、酵素、噬菌體/黏土、抗菌肽、免疫力 (疫苗和抗體) 及植生素 (Gadde *et al.* 2017)，其中益生菌可與病原菌競爭 (和抑制)，並分泌酵素增加飼料效率 (圖 1)；益生質可促進益生菌生長；有機酸則可抑制病原菌並增加蛋白質分解；酵素可促進飼料分解，增強營養成分再利用率，減少發炎促進生長效能；噬菌體可專一

*論文聯繫人
E -mail: wcyang@gate.sinica.edu.tw

一地消除特定病原菌；抗菌肽透過破壞細菌細胞膜的機制，可廣泛性的殺死病原菌；疫苗和其產生抗體可預防傳染性疾病。

在台灣，動物疫苗和益生菌的研發和商品化，有相當不錯的成效。國內有 6 家動物疫苗廠和數家動物用益生菌廠商，都有研發不錯的相關產品與銷售成績；另一亮點則為植生素，植生素為植物產生的單一化合物或混合物，是近年來熱門的動物藥或飼料添加物來源 (郭等　2021)。除疫苗外，植生素 (phytogenics) 是當前最好的無抗養殖和低抗養殖防治策略之一，也是全球農業生技公司競逐的無抗養殖重要策略 (楊 2020)。藥用植物長久以來用於治療人類和動物各項疾病，特別是傳染病。全球有 30 萬種開花植物，估計 3 萬種藥用植物，約 1 萬 8 千種有記載藥物使用。我們將以抗原蟲植生素和腸道調節植生素為例，說明不同功能性植生素於飼料產業的研發與應用。

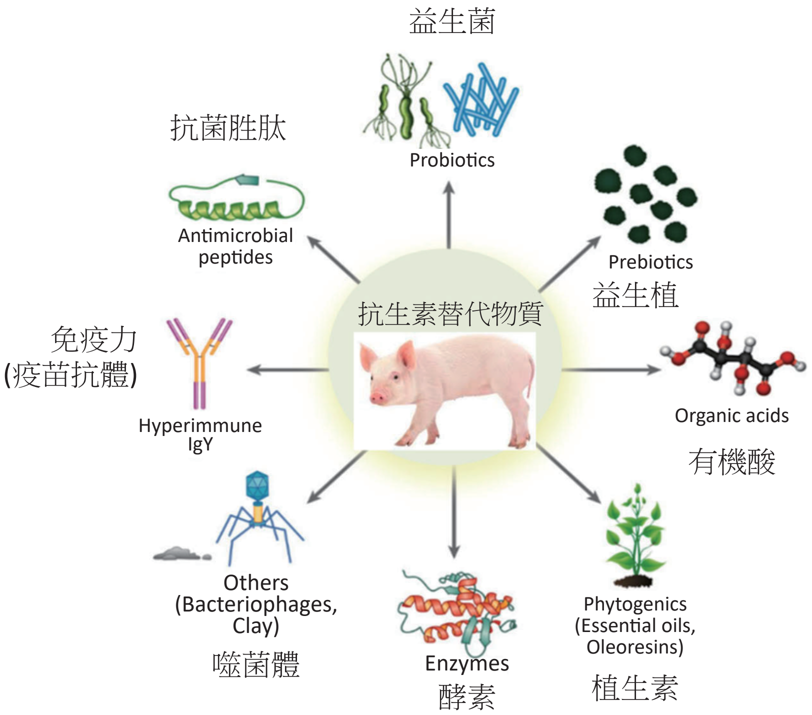


圖 1. 8 種抗生素替代物質。

Fig. 1. Eight alternatives to antibiotics.

抗原蟲植生素研發

原蟲是人類和動物的重要傳染疾病。葛洪 (公元 283–363 年) 的「肘後備急方」使用青蒿治療人類瘧疾，啟發 2015 年諾貝爾獎得主屠呦呦從青蒿找到青蒿素成功治療瘧疾。賈思勰 (公元 540 年左右) 的「齊民要術」也描述植物用於動物飼養。藥用植物優點是可以產生不同化合物，用於不同疾病，無抗生素殘留風險，許多植化物具有多靶點特性與抗藥性問題低的優點，缺點則為它們的作用機制、藥理與毒理複雜，不易驗證 (楊&楊 2016; 楊等 2015)。例如超過 1200 種植物被記載用來防治原蟲性疾病，其中僅有十餘種植物被研究與商品化 (Yang *et al.* 2015)。因此在過去幾十年中，有 33 種的植物和其化合物已經被科學性地研究其抗艾美球蟲種 (*Eimeria* species) 的活性或作用 (表 1)，包括表青蒿屬 (菊科)，常山 (繡球花科)，苦蔘 (豆科)，高麗白頭翁 (毛茛科)，大果榆 (榆科)，山皂角 (豆科)，苦楝 (楝科)，胡椒 (胡椒科)，大蕁麻 (蕁麻科)，水芹 (十字花科)，小茴香 (繖形科)，巴戟天 (茜草科)，沒什子 (橄欖科)，辣木 (辣木科)，牛至 (唇形科)，月桂 (樟科)，薰衣草 (唇形科)，香蕉 (芭蕉科)，龍葵 (茄科)，薄荷 (唇形科)，野蒜 (石蒜科)，薑黃 (薑科)，葡萄 (葡萄科)，橡樹 (殼鬥科)，五倍子 (漆樹科) 和訶子 (使君子科)。

由於植化物複雜，其作用機制方式不同。例如，青蒿是透過氧化壓力來抑制球蟲芽孢化與卵囊壁合成；帶有毒性的苦蔘、使君子和大果榆可殺死球蟲；部分香草植物所含的植物精油可抑制球蟲卵囊；野蒜和薑黃具抗發炎與抗氧化作用，可阻礙球蟲生長。但是，大部分上述藥用植物的抗蟲機制與作用都還在研發階段，需進一步科學性研究。因此，目前用於抗球蟲的上市植化物很少，只有 Cozante (美國 Kemin 公司)、Herball (瑞士 Life Circle 公司)、Norponin (法國 Norfeed 公司)、龍殺球 (Rotam-CS) 和球霸 (台灣益萬生公司) 以及青蒿/常山添加物 (大陸信德養殖)。除龍殺球和球霸外，其餘大廠產品有內容物不明，安全性與抗球蟲效果也無可參考文獻，是大部分抗球蟲植物與植化物的挑戰 (Muthamilselvan *et al.* 2016)。由於龍殺球 (咸豐草為主) 和球霸 (咸豐草和艾草為主) 的抗球蟲有效成分已被鑑定，有效成分可以當作指標成分，進行化學製造品管，確保產品批次品質與有效性 (Yang *et al.* 2021)。咸豐草與其有效成分也證實可抑制雞隻球蟲感染，主要是透過抑制球蟲芽孢子入侵宿主細胞方式，達到抑制球蟲感染與改變腸道菌相效果 (Yang *et al.* 2019)。再者，因咸豐草不直接毒殺球蟲，較不易產生抗藥性球蟲株 (圖 2)，該配方已完成實驗室與田間藥效試驗，並取得多國產品登記，在台灣、泰國、馬來西亞和越南銷售。

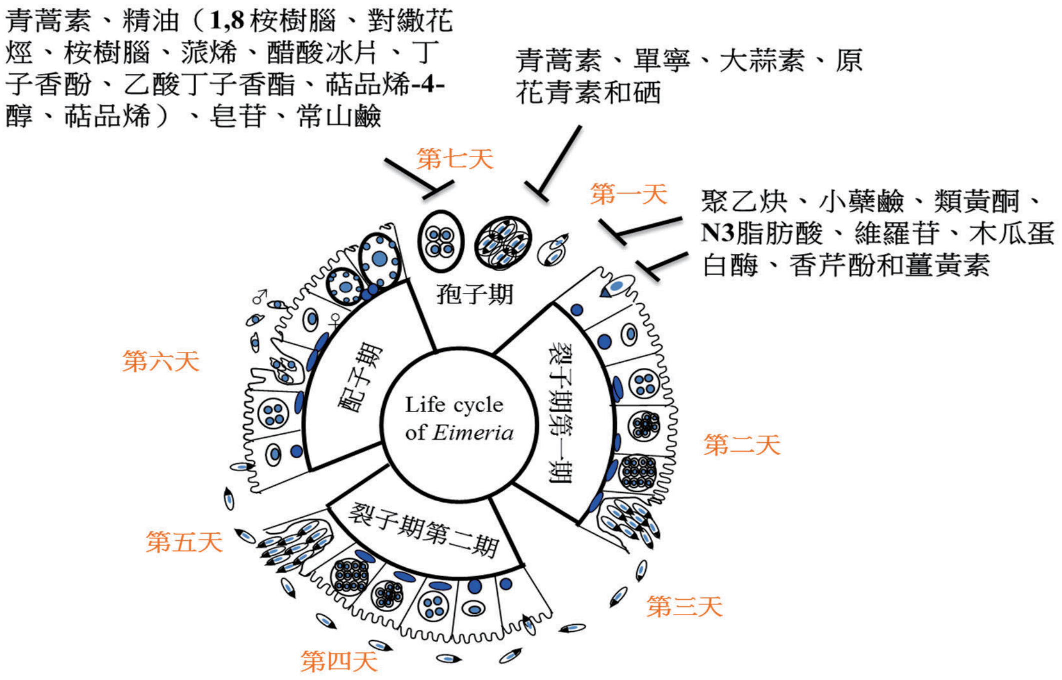


圖 2. 植物化合物作用在原蟲不同生活史階段。

Fig. 2. Phytochemicals and their intervention with the life cycle of *Eimeria* at different stages.

腸道調節植生素研發

植生素為植物產生的單一化合物或混合物，是近年來熱門的動物藥或飼料添加物來源 (楊 2020)。與化學藥物相比，植生素的研發優勢在於其為混合物具多功能的特性，無藥物殘留問題且不易產生抗藥性。缺點為其成分複雜，有效成分不易鑑定，需耗費較多時間精力。具廣泛效能的植生素，包含可提升動物生長效能和防治動物不同的疾病的作用。包括抗微生物活性、提升生長效能、穩定腸道菌相、增強群體感應的抑制以減少病菌、調節免疫力、降低有害微生物代謝物、增加攝食量、抗氧化、促進腸道消化與吸收、促進腸道健康、與改善生殖效能。抗微生物植生素可減少抗生素使用及衝擊大健康。其中機制涉及抗發炎、增加好菌、減少壞菌、減少微生物毒素、提升免疫力、改善適口性、增加腸道酵素、減少胃內食物排空和改善腸道菌相。全球已有數十家植生素廠商，生產各式不同植生素配方產品 (圖 2)。2020 年統計，全球每年植生素市場約 10 億美元，僅有 5%用於動物飼料，因此植生素在做為飼料添加產品還有巨大成長空間。百奧明公司 (Biomin) 在 2017 年針對全球畜牧業者進行調查 (Hines 2017)，發現半數農民有使用過植生素經驗，接受度高。使用目的多以增加飼料消化率和抗微生物為主 (圖 3)。在台灣的市場上有許多國外品牌的抗生素替代物質產品，對該類型產品的接受度很高。台灣在植生素產業的發展上有很好的利基，包括生物多樣性豐富，研究人力充沛、及良好天然物和藥用植物研究基礎等 (郭等 2021)。

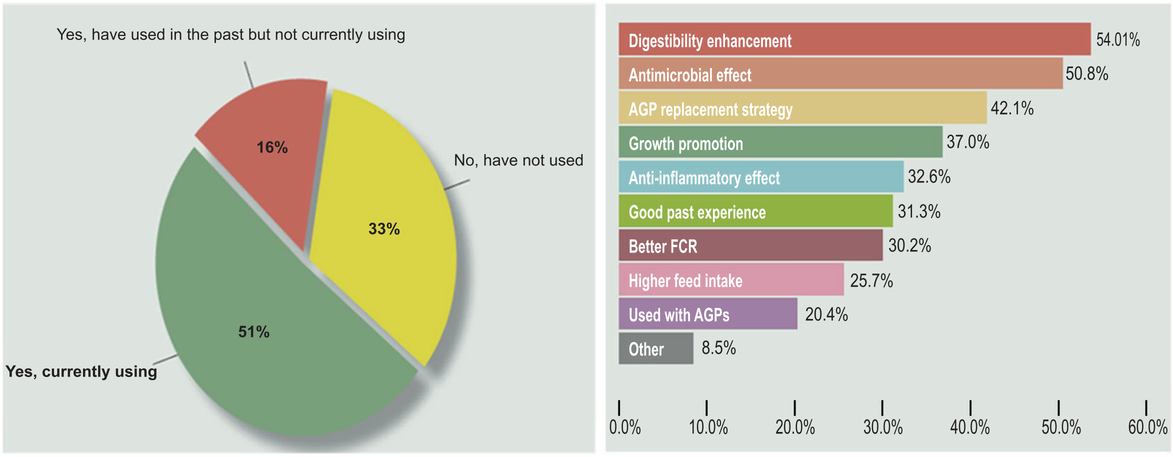


圖 3. 植生素使用者 (左圖) 和使用目的 (右圖)。

Fig. 3. Users (left) and purpose (right) of phytogenics for animals.

本土植生素研發如雨後春筍般產生。中研院楊文欽團隊研發腸道調節的植生素等 8 項植生素產品，用於雞、豬、牛和水產動物 (楊 2021)。以腸穩健 (EUBIO-Base) 為例，腸穩健是一項市場首見植生素配方，由巨埠公司製造，中化製藥銷售 (中化製藥股份有限公司 2021)，目前廣泛用於豬牛等動物，它有多種功能和作用機制如圖 4，主要是腸道菌相調節 (microbiota regulation) ，可增加益生菌、減少病原菌和腸道病變、減少下痢和動物死亡。它也可提升免疫力，動物活存率和生長效能。田間試驗結果顯示腸穩健可完全取代抗生素，減少保育豬下痢 (>90%正常便) 和增加活存率 (100%) 和生長效能。

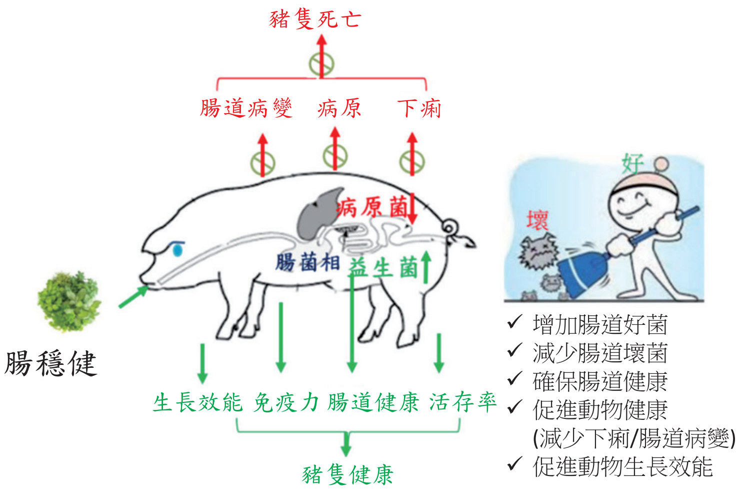
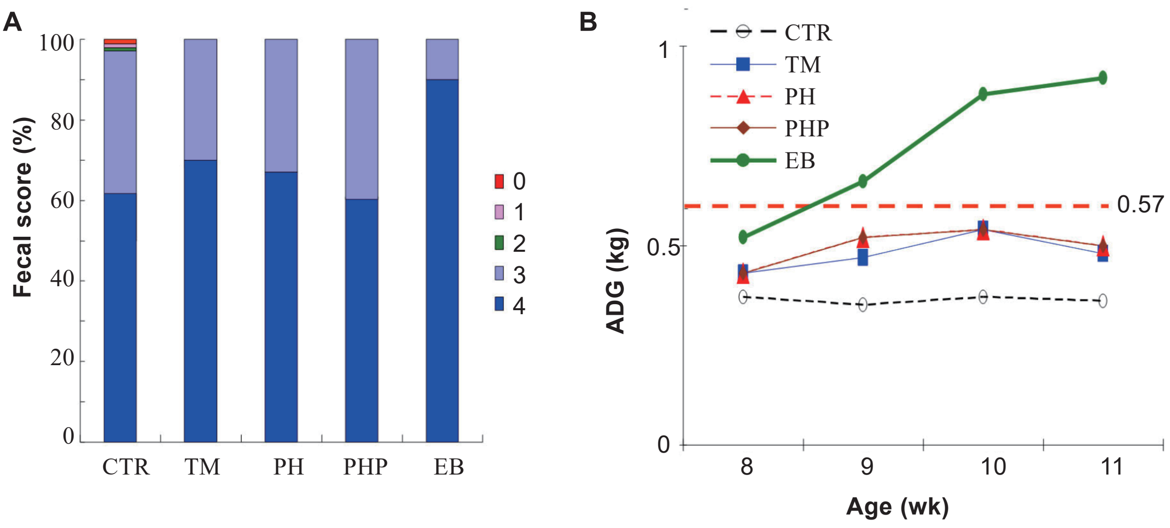


圖 4. 腸穩健作用機制。

Fig. 4. Mechanism of EUBIO-Base.

腸穩健也用於防治豬隻赤痢。它透過增加腸道益生菌和抑制腸道赤痢菌 (圖 5) 。五組豬隻分別餵食空白料和空白料添加泰妙素 (Tiamulin)、Patente Herba (PH)、Patente Herba 加強配方 (PHP) 以及腸穩健 (EB) (Delić *et al.* 2018)，結果顯示控制組 (CTR) 豬隻只有 60%正常便及 40%軟稀便 (內含 5%血便) (CTR，圖 5A)；泰妙素 (TM) 處理組豬隻有 70%正常便及 30%軟稀便 (且無血便) (TM，圖 5A)；Patente Herba (PH) 含百里香，牛至和香菜的精油混和物，其抗赤痢效果和泰妙素相似 (PH，圖 5A)；PHP 處理組 (百里香，牛至和香菜的精油和栗子萃取物) 豬隻有 60%正常便及 40%軟稀便 (且無血便) (PHP，圖 5A)；腸穩健 (EB) 處理組豬隻有 90%正常便及 10%軟稀便 (且無血便) (EB，圖 5A)，且腸穩健 (EB)處理組豬隻也有較好的平均日增重 (average daily gain, ADG)。以上，顯示腸穩健比泰妙素和其他植生素，對赤痢菌有較好的防治效果；另腸穩健可連續使用，不會有抗藥性，且可降低牧場的抗藥細菌，包括大腸桿菌和沙氏桿菌。

中研院團隊研發的腸穩健有優異的效能和詳細新穎的作用機制，正反映台灣植生素研究優勢。這些植生素產品可協助農業和畜牧業的永續經營，也提供無抗養殖的不同選擇。



4 = Normal feces; 3 = soft yellow to gray feces ; 2 = watery yellow feces; 1 = feces with mucus and bloody flecks; 0 = watery feces with large mucus and blood

CTR: blank feed
TM: 10% Tiamulin (1 kg/t)
Patente Herba (PH): EO blend of *Thymus vulgaris*, *Origanum vulgare* and *Coriandrum sp*. (2kg/t)
PHP: PH + *Castanea sativa* extract (1 kg/t)
EB: EUBIO-Base

圖 5. 腸穩健 (EU)、泰妙素 (TM) 和其他兩項植生素 (PH 和 PHP) 在防止豬赤痢比較(Delić *et al.* 2018)。(A) 糞便指數和 (B) 豬隻日平均增重。

Fig. 5. Anti-Brachyspira efficacy of EUBIO-Base (EB), tiamulin (TM), patente herba (PH) and a mixture of patente herba and *C. sativa* extract (PHP). (A) fecal score; (B) average daily gain (ADG).

結論及展望

每年全球飼料市場有 4300 億美元，其中飼料添加物市場約 300 億美元，功能性植生素配方為無抗養殖下非常好的產品。然而，植生素的功能和機制比化學藥複雜。植生素相容性高，可和不同飼料成分混合，例如飼料昆蟲 (替代蛋白) ，可以促進蛋白消化吸收。植生素也可以和營養補充品或其他抗生素替代物質一起應用於飼料中，例如促進益生菌生長的植生素和益生菌 (probiotic) 形成共生質 (symbiotic)。這些飼料添加物和飼料營養成分 (如昆蟲蛋白) 對我國飼料產業鏈，提供巨大的商機。就植生素配方而言，首重功效，除有效成分與作用機制清楚之外，需考慮其安全性，最好為可食性食物 (無毒性問題)。植物最好有生長強勢與栽培容易的特點，具貨源充足與價格便宜之優勢。若能開發為經濟動物的飼料添加物或動物用藥，除增加農民收入外，更可活化農地，成為農業新藍海作物與產業。也可幫助農業、畜牧業者和生技製藥業者，打造台灣隊，爭取國際市場和替代進口，提升產業競爭力和創造多贏局面。

誌謝

本文係作者等獲得科技部計畫「MOST 109-2321-B-001-013」、「MOST 110-2321-B-001-015」和中研院「AS-KPQ-110-ITAR-09」所產出。作者謹此一併誌謝。

引用文獻

中化製藥股份有限公司。2021。 腸穩健。Retrieved from http://www.ccpp.com.tw/_tw/01_prod uct/02_detail.aspx?AID=1360

郭恬屷、楊孟庭、楊詠嵐、李懿珊、鐘仁甫、梁佑全、楊文欽。 2021。 植生素科技在畜牧業的研究、應用和優勢。中化藥訊。 83: 1–5。

楊文欽。2020。中研院農生中心聚焦菊科植物萃取物。環球生技月刊。 79: 94–96。

楊文欽。2021。 產業貢獻. Retrieved from http://abrc.sinica.edu.tw:85/wcy/industry.php

楊孟庭、楊文欽。 2016。 藥用植物在家禽球蟲病的研發與應用. 中央研究院週報。 1570: 1–3。

楊孟庭、楊文欽、張力天。2015。 小草也可以立大功。科學發展。 515 (11): 52–56。

Delić, N., V. Drašković, J. Stevanović, B. Savić, N. Lakić, J. Bošnjak-Neumuller, and Z. Stanimirović. 2018. The efficacy of two phytogenic feed additives in the control of swine dysentery. Acta Vet–Beograd, 68(2): 178–189. doi: 10.2478/acve-2018-0016

Gadde, U., W. H. Kim, S. T. Oh, and H. S. Lillehoj. 2017. Alternatives to antibiotics for maximizing growth performance and feed efficiency in poultry: a review. Anim. Health Res. Rev. 18(1): 26–45. doi:10.1017/S1466252316000207

Hines, R. 2017. Phytogenic Feed Additives Survey Results. In Biomin (Ed.), (pp. 1-14): Biomin.

Muthamilselvan, T., T. F. Kuo, Y. C. Wu, and W. C. Yang. 2016. Herbal Remedies for Coccidiosis Control: A Review of Plants, Compounds, and Anticoccidial Actions. Evid. Based Complementary Altern. Med. 2016,2657981. doi:10.1155/2016/2657981

Yang, M. T., Y. X. Lin, G. Yang, T. F. Kuo, Y. C. Liang, T. H. Lee, C. L. Chang, and E. C. Yang. 2021. Functional and Mechanistic Studies of Two Anti-coccidial Herbs, Bidens pilosa and Artemisia indica. Planta Med. in press

Yang, W., Y. Tien, C. Chung, Y. Chen, W. Chiou, S. Hsu, and C. L. T. Chang. 2015. Effect of Bidens pilosa on infection and drug resistance of Eimeria in chickens. Res. Vet. Sci. 98: 74–81. doi: 10.1016/j.rvsc. 2014.11.002.

Yang, W. C., C. Y. Yang, Y. C. Liang, C. W. Yang, W. Q. Li, C. Y. Chung, M. T. Yang, T. T. Kuo, C. F. Lin, C. L. Liang, and C. L. T. Chang. 2019. Anti-coccidial properties and mechanisms of an edible herb, Bidens pilosa, and its active compounds for coccidiosis. Sci. Rep. 9, 2896. https://doi.org/10.1038/s41598-019-39194-2.

表 1. 抗球蟲植物和其作用。

Table 1. Anticoccidial plants and their modes of action.

SN	Plant	Plant preparation	*Eimeria* species[a]	Mode of action[b]
1	*Artemsia annua/A. sieberi/A. argyi/A. asiatica/A. afa*	Petroleum ether/decoction/acetone extract	Et	OC↓, BD↓, LS↓, M↓, FC↑
2	*Dichroa febrifuga*	Chloroform extract	Et	WG↑, OC↓, BD↓, LS↓, M↓
3	*Sophora flavescens*	Decoction	Et	WG↑, OC↓, BD↓, LS↓, M↓
4	*Sinomenium acutum*	Decoction	Et	WG↑, OC↓, BD↓, LS↓, M↓
5	*Quisqualis indica*	Decoction	Et	WG↑, M↓
6	*Pulsatilla koreana*	Decoction	Et	WG↑, LS↓
7	*Ulmus macrocarpa*	Decoction	Et	LS↓
8	*Gleditsia japonica*	Decoction	Et	LS↓
9, 10	*Melia azedarach/M. azadirachta*	Decoction/Fresh juice	Et/mixed species	WG↑, LS↓/OC↓
11	*Piper nigrum and Urtica dioica*	Ethanolic extract	Mixed species	OC↓
12	*Lepidium sativum*	Ethanolic extract	Et	OC↓, LS↓, M↓, WG↑
13	*Foeniculum vulgare*	Ground leave powder	Et	OC↓, LS↓, M↓, WG↑, BD↓
14	*Morinda lucida*	Ground leave powder	Mixed species	WG↑, OC↓
15	*Commiphora swynnertonii*	Ethanolic resinous extract	Oocysts	OC↓, M↓, WG↑
16, 17	*Moringa Oleifera* *M. stenopetala*	Acetone leave extract Ground leave powder	Mixed species Et	WG↑, OC↓ OC↓, LS↓, WG↑

SN	Plant	Plant preparation	*Eimeria* species[a]	Mode of action[b]
18	*Origanum* spp. (oregano)	Essential oil	Mixed species	OC ↓ , LS ↓ , M ↓ , WG ↑
19	*Laurus nobilis* (bay leave)	Essential oil	Mixed species	OC ↓ , LS ↓ , M ↓ , WG ↑
20	*Lavandula stoechas* (lavander)	Essential oil	Mixed species	OC ↓ , LS ↓ , M ↓ , WG ↑
21	*Musa paradisiaca* (banana leave)	Methanol extract	Et	OC ↓ , PCV ↑
22	*Solanum nigram*	Decoction	Et	WG ↑ , FC ↑
23	*Mentha arvensis*	Decoction	Et	WG ↑ , FC ↑
24	*Mangifera indica* (mango)	Decoction	Et	WG ↑ , FC ↑
25	*Tulbaghia violacea*	Acetone extract	Et	OC ↓ , LS ↓ , FC ↑
26	*Vitis vinifera* (grape)	Acetone extract	Et	OC ↓ , LS ↓ , FC ↑
27	*Carica papaya / Vernonia amygdalina*	Fresh juice	Et	WG ↑ , OC ↓ , BD ↓ , M ↓
28, 29	*Galla rhois*	Ground powder	Et	OC ↓ , LS ↓ , M ↓ , WG ↑
30, 31, 32	*Q. infectoria, R.chinensis, T. chebula*	Decoction	Et, Em, Ea	OC ↓ , LS ↓ , M ↓
33	*Bidens pilosa*	Decoction	Et, mixed species	WG ↑ , OC ↓ , BD ↓ , LS ↓ , M ↓

[a] *Eimeria* species: Et, *E. tenella*, Ea: *E. acervulina*, and Ema: *E. maxima* .

[b] Oocyst count (OC), Body weight gain (BG), Gut lesion (LS), Mortality (M), Bloody diarrhea (BD), Feed consumption (FC) and Packed cell volume (PCV).

Development and Application of Functional Phytogenics in Feed Industry

Greta Yang[1], Tien-Fen Kuo[1], Ren-Fu Chung[1], Yi-Shan Lee[1], Chuan-Ju Lin[1], Wen-Yuh Lin[1], Yu-Chuan Liang[1], and Wen-Chin Yang[1,2,3*]

[1]Agricultural Biotechnology Research Center, Academia Sinica, Taiwan, ROC.

[2]Herbal Medicine division, Academia Sinica, Taiwan, ROC.

[3]Translational Medicine, Academia Sinica, Taiwan, ROC.

Abstract

Phytogenics are composed of a single plant compound or a mixture of plant compounds. They can be used to prevent and treat animal diseases or improve animal health, growth efficiency or reproductive efficiency. They can be developed into animal medicine or feed additives for use in animals or their feed and drinking water. Phytogenics are currently used in 5% of animal feeds. They are valued at 1 billion US dollars and, thus, there is huge room for growth of their market worldwide. This article reviews and discusses the current status, industrial potential, and research and application of phytogenics, including the types and characteristics of phytogenics in the current market, efficacy, and mechanism of the phytogenics. The con and pro of phytogenics in animal feed industry are emphasized and discussed in this presentation.

Key words: Phyotgenics, Feed additives, Alternatives to antibiotics, Antibiotic-free farming, Animal health.

*Corresponding author.
E-mail: wcyang@gate.sinica.edu.tw

昆蟲蛋白在養殖漁業的發展潛力分析

林盈甄 [1,*] 莊凱恩 [1]

[1] 行政農業委員會農委會農業試驗所農業經濟組助理研究員。台灣 台中市。

摘要

食用魚類需求持續成長，預估 2030 年養殖漁業將必須提供全球 62%魚類食用需求，為能持續獲利與發展，控制飼料成本與使用高營養飼料為養殖漁業擴大經營的挑戰。飼料中魚粉為主要蛋白質成份來源，然而魚粉受到可利用海洋資源之有限性，及其他市場對魚粉需求增加，魚粉國際價格逐年上升，對養殖漁業與飼料製造廠商產生經營壓力，因此開發可替代水產飼料中魚粉之原料為必要策略。魚粉替代來源包括陸水生植物、昆蟲、蚯蚓、生物蓄團與單細胞生物，其中昆蟲最符合永續發展要求，飼養昆蟲所需要之土地面積和水量，皆低於其他陸生植物與動物，製造過程為低生態足跡，在消費者注重永續消費趨勢下，昆蟲源水產養殖飼料具有發展潛力。確認昆蟲飼料之經濟可行性對商業發展有其重要性，因此本文藉由文獻探討與次級資料分析，評估水產養殖戶與產業利害關係人接受度、消費者對昆蟲飼料養殖產品購買意願，以及昆蟲飼料之生產成本收益。將昆蟲粉用於替代魚粉需求量高之魚種飼料，可降低其對魚粉依賴，此外，因昆蟲具特殊成分亦可朝向開發機能性飼料，提升昆蟲產品附加價值，在魚粉價格持續升高以及重視環境永續趨勢下，發展水產養殖昆蟲飼料具有經濟可行性。

關鍵詞：昆蟲蛋白、昆蟲飼料、水產養殖、市場可行性。

前言

由於海洋可利用資源越來越缺乏，且受消費需求增加造成養殖漁業有擴大規模壓力，為提升產量與品質，養殖漁戶對高營養且轉換效率高之飼料有高度需求。但國際魚粉價格持續上升可能使得飼料價格逐漸提高，也直接墊高養殖漁戶生產成本，因此發展魚粉替代原料以及發展高營養價值水產飼料，為各家飼料製造廠商之發展趨勢。本文從歐盟發展、產業化趨勢以及消費者接受度等面向，進行分析，評估昆蟲蛋白在養殖漁業之發展潛力。

昆蟲產品添加於水產養殖飼料之發展趨勢

全球人口增加且因健康取向之飲食習慣，消費者對食用魚類需求漸增，目前食用魚來源可分為捕撈與養殖，預估至 2030 年養殖漁業將必須供應全球 62% 食用魚類 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO 2020)，因此全球養殖漁業產業需持續擴大以因應持續上升之消費需求。而養殖業者若想要擴大經營規模且增加市場佔有率，佔總生產成本約 40–70%、佔變動成本 75%–85% 之飼料投入 (Arru *et al.* 2019)，為養殖規模擴大的最大障礙。此外，對於飼料製造廠商而言，若能掌握食用魚需求增加趨勢，提供轉換效率高且具價格競爭力之優質飼料，則能因應需求而獲利。然而，

*論文聯繫人
E-mail: yclin84@tari.gov.tw

作為飼料主要原料之魚粉，國際價格逐漸上漲，造成養殖戶擴大規模與飼料廠商生產壓力，因此，飼料廠與養殖戶皆開始關注降低魚粉使用議題，飼料廠商有意願投入與降低魚粉使用有關之研究。

魚粉為水產養殖飼料中重要蛋白質來源，但近 10 年，受到魚群過度捕撈、聖嬰現象發生使漁獲量不穩定、其他市場對魚粉需求增加以及捕撈配額影響，魚粉價格逐漸高漲，其國際價格從 1999 年每公噸 433 美元 (以匯率 30 換算，新台幣 13 元/公斤)，上升至 2013 年每公噸 1,747 美元 (以匯率 30 換算，新台幣 52 元/公斤)，增加 303% (Mitra 2021)。除價格因素外，使用魚粉也有重金屬疑慮，因此飼料製造廠商為維持競爭力，積極尋求魚粉替代來源。

以大豆粉取代養殖飼料中的魚粉在產業上已被普遍使用，但大豆粉仍有其需要克服的缺點，包括蛋胺酸 (methionine) 和賴胺酸 (lysine) 等必需胺基酸缺乏、蛋白質含量偏低、含有營養抑制因子與不容易消化之碳水化合物等問題，影響取代魚粉的可行性 (Llagostera *et al.* 2019)，此外大豆粉尚有國際價格波動與基改疑慮問題。

除大豆粉外，還有多項研究針對陸水生植物、昆蟲、蚯蚓與生物蓄團 (biofloc)、單細胞生物等的魚粉替代物研究 (Mitra 2021)，其中昆蟲飼料被認為最能符合聯合國永續發展目標 (SDGs)。養殖昆蟲與種植大豆相較，生產相同產量蛋白質，昆蟲養殖所需之土地面積和水較少，可保育和永續利用陸域生態系統，避免讓森林變為農地而喪失生物多樣性 (SDGs15); 昆蟲粉取代魚粉，有助於永續海洋利用和保護海洋資源 (SDGs14)。此外昆蟲可將食品產業之副產物與食物消費剩餘之有機物質有效率轉化為蛋白質，養殖後剩餘物質可做為肥料，從原料到消費之過程達零廢棄循環目標，不僅符合永續生產與消費模式 (SDGs12)，也同時朝向循環經濟發展 (Madau *et al.* 2020)。

為降低風險，昆蟲作為飼料使用，於歐美國家有權責機關管制，歐盟於 2017 年 7 月 1 日頒布歐盟 2017/893 條例，允許 7 種昆蟲可做為水產養殖飼料之蛋白質來源，包括黑水虻 (*Hermetia illucens*, black Soldier Fly)、家蠅 (*Musca domestica*, housefly)、麵包蟲 (*Tenebrio molitor*, mealworm)、外米偽步行蟲 (*Alphitobius diaperinus*, lesser mealworm)、家蟋蟀 (*Acheta domesticus*, house cricket)、短翅竈蟋 (*Gryllodes sigillatus*, banded cricket)以及田蟋蟀 (*Gryllus assimilis*, field cricket) (Sogari *et al.* 2019)。歐盟對昆蟲飼料除了規範種類以外，還對於養殖昆蟲使用之飼料種類、加工方式及食品安全有所管制。

昆蟲製品於飼料產業之商業發展

人類食用昆蟲歷史悠久，中國在 3,200 年前即有食用昆蟲記錄 (Yi *et al.* 2010)，唐朝有紀錄將黃蜂幼蟲與蛹使用於料理中 (Govorushko 2019)。目前擁有食用昆蟲習慣之人口集中於熱帶，推估 2030 年食用昆蟲市場規模為 730,000 公噸，產值為 80 億美金 (Pippinato *et al.* 2020)，其來源 92% 為野外捕獲 (wild harvest)、6% 為半飼養 (semi domestication)、2% 養殖於良好控制環境 (farmed) (Madau *et al.* 2020)。

2016 年全球飼料(含禽類、畜牧、水產、寵物等)產量為 10.322 億公噸，其中水產養殖飼料佔 3.8% (Govorushko 2019)。雖水產養殖飼料產量低於禽畜飼料，但其占 51%昆蟲蛋白使用，水產養殖飼料為昆蟲蛋白主要市場。昆蟲飼料市場規模以 2018 年的 12% 年成長率估算，至 2024 年預計可達 13.694 億美元，主要消費地區為水產養殖盛行之亞洲 (Madau *et al.* 2020)。

昆蟲飼料生產以歐美企業為產業領導者，荷蘭與法國企業於昆蟲飼料產業佔有領先地位 (Madau *et al.* 2020)，目前歐洲可生產昆蟲飼料的公司或新創企業包括 Ynsect、Protix、 Mutatec 和 Hermetia Baruth GMBH (Arru *et al.* 2019)，而歐盟非營利組織-昆蟲食物與飼料平台 (International Platform of

Insects for Food and Feed, IPIFF) 則已有 78 個成員。

就昆蟲種類而言，黑水虻（*Hermetia illucens*）、家蠅（*Musca domestica*）、蠶（*Bombyx mori*）及麵包蟲（*Tenebrio molitor*）被認為具有可商業化量產的潛力 (Govorushko 2019)。其中麵包蟲可量產原因，包括粗蛋白質與脂質含量高、含有必須胺基酸、容易飼養、且已量產作為食蟲寵物飼料和魚餌產品 (Arru *et al.* 2019)。 2017 年 7 月至 2018 年 10 月，歐盟製造商已生產 1,000 公噸商品化昆蟲蛋白產品 (Mulazzani *et al.* 2021)。因此，從昆蟲飼料市場年增率、新創公司加入產業、部分昆蟲具備商業化量產與加工技術，且有商品販售等現況來看，顯示於歐盟國家中，昆蟲飼料為具成長性的新興產業。另歐盟除對昆蟲加工為蛋白質產品有所管制，但對昆蟲油則無使用範圍管制 (Sogari *et al.* 2019)，可使用於禽畜動物飼料中。

然而歐盟生產之昆蟲粉產品目前尚缺乏價格競爭力，因歐盟養殖與加工昆蟲需符合嚴格規範以及品質標準認證，且生產規模尚小。以昆蟲粉為例，歐盟廠商製造蛋白質含量 60-70% 之昆蟲粉產品，成本每公斤介於 3.5–7 歐元之間，遠高於魚粉、大豆粉、小麥與玉米蛋白粉。而非洲與亞洲生產之蛋白質含量 55% 昆蟲粉產品，每公斤成本僅 1.2–2.5 歐元 (Mulazzani *et al.* 2021)；具量產潛力之麵包蟲產品價格為每公斤 6 美元，黑水虻產品價格每公斤 2.5 美元 (Llagostera *et al.* 2019)，前述昆蟲粉價格皆較魚粉高。

昆蟲飼料之市場可行性

歐盟已開放管制種類之昆蟲源蛋白質可使用於水產養殖飼料，且消費者對於昆蟲飼料使用於水產養殖之接受度優於其他動物，如豬、牛等 (Verbeke *et al.* 2015)，顯示水產養殖昆蟲飼料為可發展方向，但若要實際商業化發展，水產養殖戶與產業利害關係人的接受度、消費者對昆蟲飼料養殖產品購買意願、以及昆蟲飼料之生產成本收益，都會直接影響昆蟲飼料之商業發展可行性。

(一) 利害關係人對昆蟲飼料觀點

水產養殖戶是否願意於實際養殖作業中使用，對昆蟲飼料市場規模擴大具有直接影響。Verbeke *et al.* (2015) 指出受訪畜牧戶相較於農產業利害關係人與非產業內人士，對於昆蟲飼料使用風險感知程度高，且因對昆蟲飼料有營養價值與安全性疑慮而使用意願偏低；農產業利害關係人則對昆蟲飼料的利益感知程度高，且比起畜牧戶更相信昆蟲飼料可以降低畜養過程之生態足跡。整體受訪者皆認為相較於傳統飼料，昆蟲飼料更具永續性、營養價值，但在微生物安全性則被認為較傳統飼料差。

Rumbos *et al.* (2021) 透過半結構式訪問水產飼料廠商與水產養殖戶共 9 家，詢問其對昆蟲飼料製造與使用意願，其中有 4 家具有高度使用或製造意願，僅 1 家持反面意見。願意使用廠商認為昆蟲飼料可讓經營事業降低環境生態足跡、有助於創新性發展及強化事業永續性；而不考慮使用的廠商，則認為生產成本可能因昆蟲飼料售價高而提高，以及對消費者的接受度有疑慮。

Mulazzani *et al.* (2021) 指出影響水產養殖戶選擇飼料的因子，除了考量飼料價格、漁產品售價、飼料轉換效率等經濟面原因以外，還包括是否需要改變販售通路或另闢產品生產線，技術面則會考量轉換為昆蟲飼料是否需要調整養殖作業流程。不同經營規模與供應通路也會影響水產養殖戶的飼料選擇，規模小且供應高品質漁產品至利基市場之水產養殖戶，因原本已在使用不含動物副產品的高價飼料，因此若昆蟲飼料能保證高飼料轉換效率、提升漁產品品質，並且可為漁產品在永續性訴求加值，這些經營利基市場之小型家庭式養殖戶之使用意願高；但經營規模大之水產養殖戶，則因其考量成本，多使用含有動物副產物低價飼料，且因其產品多供應至連鎖通路，需遵循通

路養殖規範，致使大型養殖戶使用昆蟲飼料意願低。

(二) 消費者對昆蟲飼料觀點

消費者對昆蟲飼料養殖之產品購買意願，會影響水產養殖戶是否願意使用昆蟲飼料。影響消費者是否願意購買因素包括感知風險、對魚肉感官品質影響程度。Mancuso *et al.* (2016) 透過量化調查蒐集義大利 277 位消費者對以昆蟲飼料養殖漁產品之接受度，90% 受訪者對於永續水產養殖飼料研究議題具有興趣，90% 受訪者對水產養殖飼料中添加昆蟲粉持正面態度，76% 願意購買使用創新飼料 (昆蟲粉) 養殖的漁產品，23.8% 受訪者認為目前歐盟尚無可量產之昆蟲飼料產品、且創新產品需投入開發成本，所以願意用較高價格購買相關產品；而消費者不願意購買的原因，則包括感受不佳、不信任製造過程以及可能影響漁產品品質。

Rumbos *et al.* (2021) 研究顯示， 67.6% 希臘受訪者對將昆蟲用於魚類養殖持正面態度，71% 受訪者願意購買，原因為能降低養殖環境生態足跡，其次能降低養殖漁業對野生魚群捕撈的壓力。

Szendrő *et al.* (2020) 指出，匈牙利消費者購買野放 (free-range) 方式飼養之動物意願，高於以昆蟲飼料所飼養的動物，雖野放養殖動物於飼養環境中也會食用昆蟲，但因被認為可維護動物福利，較具消費吸引力；另因一般消費者不了解飼料對自然環境衝擊，因此無法了解傳統飼料與昆蟲飼料對永續環境之差異。此外影響購買以昆蟲飼料養殖動物的意願因子方面，受訪者認為沒有風險最為重要。

Llagostera *et al.* (2019) 比較野生捕撈、魚粉飼料養殖、植物粉飼料養殖、昆蟲粉飼料養殖漁產品之消費者願付價格，其中以野生捕撈最高 23.46 歐元/公斤；植物粉飼料 (17.20 歐元/公斤) 與昆蟲粉飼料養殖之漁產品 (16.39 歐元/公斤) 願付價格相近，魚粉飼料養殖漁產品 (11.86 歐元/公斤)最低，因此預期消費者對昆蟲粉養殖之漁產品有購買意願；另比較三種飼料養殖方式對環境 (除野生捕撈)之衝擊，消費者認為昆蟲粉飼養對環境之衝擊最低，但在漁產品食味品質方面，受訪者則認為昆蟲飼料養殖之漁產品可能降低品質的程度最大。

(三) 成本收益觀點

成本收益是水產養殖戶是否願意轉換飼料的重要考量，而影響成本收益之因素包括昆蟲飼料售價、飼料轉換率與消費者接受程度。Arru *et al.* (2019) 透過小規模鱸魚養殖戶個案分析，藉由實際成本收益數據，及 (1) 昆蟲飼料部分取代魚粉將降低飼料轉換效率，與 (2) 昆蟲飼料價格高於魚粉假設下，推估若以麵包蟲粉取代 50% 魚粉，則飼料價格增加 197.3%，若要維持農戶收益，麵包蟲粉飼料售價則需從每公斤 1.85 歐元下降至 1.68 歐元。另 Mulazzani *et al.* (2021) 在假設昆蟲粉取代魚粉不影響飼料轉換率，以及消費者接受程度相同情境下，估算以昆蟲粉取代 50% 魚粉，將使得鱒魚飼料售價每公斤增加 25%，而鱸魚飼料售價每公斤增加 28%。

我國水產養殖飼料發展昆蟲蛋白質之可行性

依據經濟部技術處 2020 年食品產業年鑑，飼料指供給家畜、家禽、水產類營養或促進健康成長的食料。臺灣飼料產業可分為禽畜水產飼料和寵物飼料，2020 年動物飼料製造業銷售值為新台幣 72,776,420 千元。其中水產養殖飼料重要蛋白質來源之魚粉，我國主要進口來源國為祕魯、墨西哥與智利，近年也開始從日本與阿曼等國進口 (圖 1)，我國魚粉年進口量從 2002 年 230,740 公噸下降至 2020 年 132,187 公噸 (圖 2)，相同期間，進口到岸價格則從每公斤 0.64 美元，約每公斤新台幣 19.2 元 (以匯率 30 換算)，增加至 109 年每公斤 1.32 美元，約每公斤新台幣 39.6 元 (以匯率 30 換算)，18 年間增加 106%(表 1)。(國際貿易中心查詢 https://www.intracen.org/itc/market-info-tools/market-analysis-tools/)，魚粉價格增加造成飼料製

造成本漸增。財團法人食品工業研究所，針對總體飼料環境進行分析後發現，我國水產飼料技術方面應著重於魚粉替代蛋白質研發，以減緩國際價格漸增之魚粉造成之飼料製造成本上升趨勢。

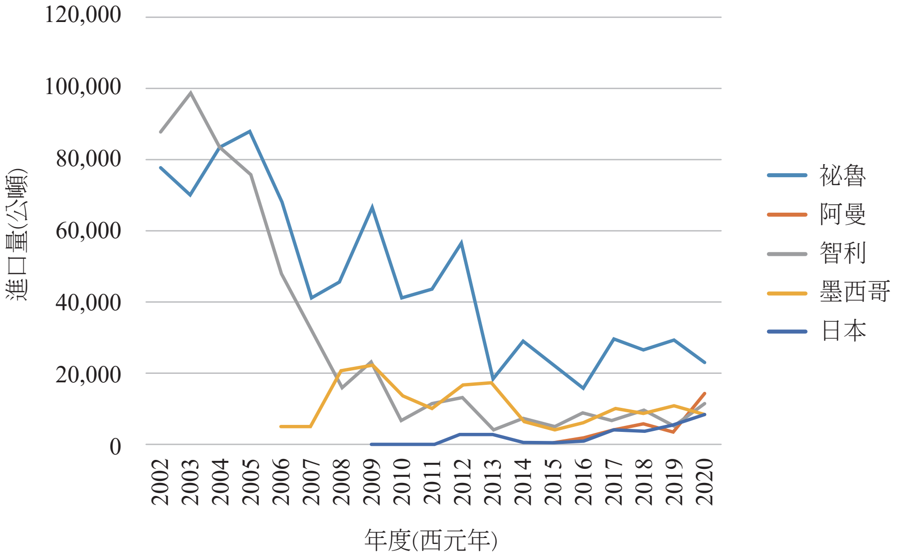


圖 1. 我國魚粉進口主要來源國之進口量趨勢

Fig. 1. The trend of imported quantity of Taiwan fishmeal main importers

資料來源: 國際貿易中心 2021 年 9 月查詢

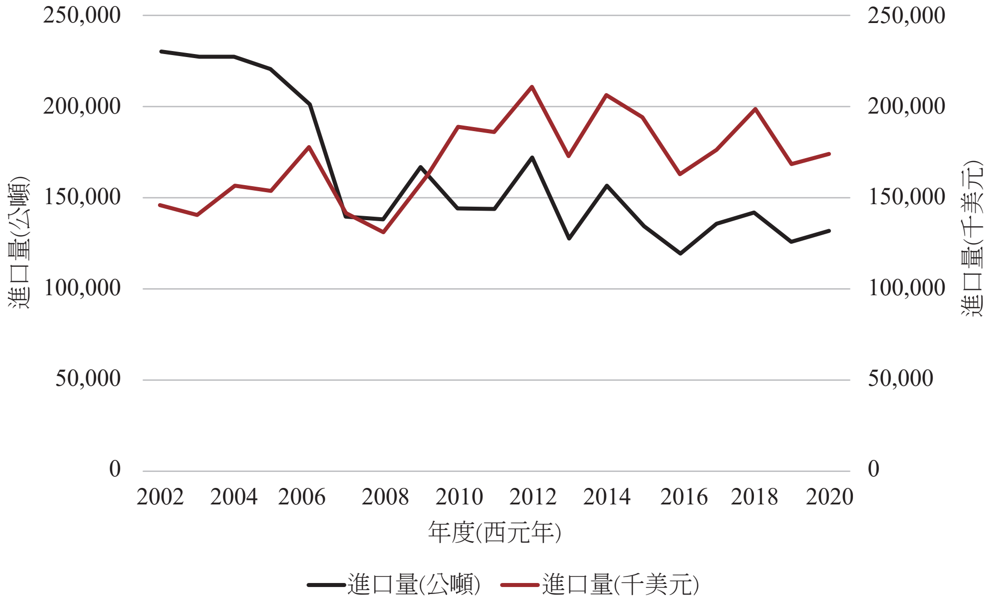


圖 2. 我國魚粉總進口量與進口價值趨勢

Fig. 2. The trend of Taiwan's fishmeal imported quantity and value

資料來源:國際貿易中心 2021 年 9 月查詢與本研究整理

表 1. 我國進口魚粉到岸價格趨勢

Table 1. The CIF of Taiwan imported fishmeal

年度(西元年)	到岸價格 (美元/公斤)	到岸價格 (新台幣/公斤) 匯率 30
2002	0.64	19.2
2003	0.62	18.6
2004	0.69	20.7
2005	0.70	21.0
2006	0.89	26.7
2007	1.01	30.3
2008	0.95	28.5
2009	0.94	28.2
2010	1.31	39.3
2011	1.29	38.7
2012	1.22	36.6
2013	1.36	40.8
2014	1.32	39.6
2015	1.44	43.2
2016	1.36	40.8
2017	1.29	38.7
2018	1.40	42.0
2019	1.34	40.2
2020	1.32	39.6

資料來源:國際貿易中心 2021 年 9 月查詢與本研究整理

我國主要的養殖魚類中，石斑魚養殖飼料對魚粉依賴性高，依據漁業署統計年報，108 年石斑魚飼料製造量 25,579.5 公噸。以飼料中含有 40% 魚粉估算，養殖石斑魚全年魚粉需求量推估約為 10,231.8 公噸。若以石斑魚飼料中魚粉 50% 含量改以昆蟲粉取代，昆蟲粉添加於石斑魚飼料之全年需求量推估為 5,115.9 公噸。

台灣魚粉 2020 年進口平均到岸價格，每公斤為 39.6 元新台幣 (表 1)，但因不同進口來源國魚粉品質不同，單價有所差異，2020 年進口量最多之祕魯，其魚粉進口到岸價格每公斤新台幣 43.2 元，而泰國為每公斤新台幣 35.1 元 (表 2)。

表 2. 2020 年我國進口魚粉不同來源國家之進口量值與單價

Table 2. Imported quantity, imported value and unit price of Taiwan fishmeal main importers in 2020

進口來源國家	進口值 (千美元)	進口量 (公噸)	單價 (美元/公斤)	單價 (新台幣/公斤) 匯率 30
祕魯	33,331	23,193	1.44	43.2
阿曼	18,891	14,104	1.34	40.2
智利	17,864	11,671	1.53	45.9
日本	11,758	8,243	1.43	42.9
墨西哥	11,381	8,648	1.32	39.6
美國	9,722	7,494	1.30	39
丹麥	9,615	5,589	1.72	51.6
阿根廷	7,720	6,921	1.12	33.6
馬來西亞	7,576	6,247	1.21	36.3
摩洛哥	5,323	3,918	1.36	40.8
巴西	4,037	4,385	0.92	27.6
泰國	3,997	3,415	1.17	35.1
菲律賓	3,824	3,421	1.12	33.6

資料來源: 國際貿易中心 2021 年 9 月查詢與本研究整理

昆蟲粉對飼料價格影響程度，與使用意願有關，因此本研究於「昆蟲粉取代部分魚粉後能維持相同飼料轉換率」、「昆蟲粉蛋白質含量與魚粉相同」以及「轉換飼料增加之原料成本完全轉嫁於售價」情境下，推估以昆蟲粉取代石斑魚飼料中 50%魚粉用量後，飼料價格變化。

歐盟製造之高品質昆蟲粉，依據成本，每公斤價格介於 3.5 歐元至 7 歐元之間 (Mulazzani *et al.* 2021)，因此以每公斤 3.5 歐元昆蟲粉 (以匯率 33 換算，每公斤新台幣 115.5 元)，作為估算依據。若以昆蟲粉取代石斑魚飼料中 50%魚粉使用量 (假設飼料中魚粉含量為 40%)，當魚粉每公斤為新台幣 43.2 元 (祕魯進口魚粉平均到岸價格)，推估售價每公斤 53.17 元之石斑魚飼料(依據電訪國內 9 家飼料業者)，使用昆蟲粉取代 50%魚粉使用量後，價格將提高至每公斤新台幣 67.63 元，增加 27.2%。

若未來因需求量上升與產業規模化，2030 年每公斤價格可降至 1.5 歐元至 2.5 歐元之間 (Byrne 2021)，以每公斤 1.5 歐元 (以匯率 33 換算，每公斤新台幣 49.5 元)之昆蟲粉取代 50%魚粉使用量之石斑魚飼料，其價格可降至每公斤新台幣 54.43 元。

因目前國際昆蟲粉價格尚高，若要朝向取代魚粉發展，昆蟲粉需擴大生產規模，或利用自動化設備降低可能之人力需求及生產成本，增加價格競爭力。此外，除替代魚粉外，也可朝向開發飼料微量營養添加劑，針對昆蟲粉中有益於魚類免疫系統與腸道健康成分進行研究，提升昆蟲產品附加價值，使用昆蟲粉取代對魚粉倚賴度高之水產組合飼料，在魚粉價格應會

持續升高之產業環境下，具有市場可行性。

結論與展望

提升昆蟲產業規模以提高昆蟲粉價格競爭力，為昆蟲產業能持續發展的挑戰。而提升產業規模，需開拓昆蟲粉不同市場，例如禽畜飼養與水產養殖用飼料、寵物用飼料、保健食品原料或提供消費者食用等。為降低風險，現今部分國家相關權責機關已開始針對昆蟲及其加工品使用用途進行立法管制，許多科學研究也針對產業化飼養昆蟲可能累積之有害化學物質與致病微生物進行研究 (Van der Fels-Klerx *et al.* 2018)。

提高消費者購買意願為擴大市場策略之一，而消費者對新技術或新加工過程的接受程度，與其感知風險與利益相關，潛在有害物質與未知健康風險會影響消費者的選擇與使用 (Bruhn 2007)。消費者不願意購買原因依重要性排序為對安全衛生不信任、對昆蟲飼料不認同、不相信漁產品會因昆蟲飼料養殖而有高品質與高營養、對健康潛在負面影響、影響漁產品味道以及可能提高產品售價 (Rumbos *et al.* 2021)。當提供訊息讓受訪者了解昆蟲飼料有助於提升水產養殖環境的永續性，以及提升養殖魚類免疫系統之好處後，受訪者具有高度購買意願 (Naranjo-Guevara *et al.* 2021)。持續對消費者傳播新技術與加工過程為產品或環境所帶來之利益訊息，可降低消費者對產品的疑慮，因此若能向消費者傳遞昆蟲飼料的客觀資訊，提升消費者認識程度，將能促使消費者接受來自昆蟲飼料養殖的漁產品。

另水產養殖戶使用昆蟲飼料意願對產業規模擴大有直接影響，而水產養殖戶選擇轉換飼料的考量因素則包括價格、飼料效率、下游通路願意接受程度、是否可加值產品助於行銷、不需調整養殖作業等。因此昆蟲粉取代水產養殖飼料中魚粉成分時，應確保維持或提升目前傳統飼料轉換效率。若取代後飼料轉換效率降低，昆蟲粉價格仍維持高價，則會降低魚戶收益 (Arru *et al.* 2019)。另對水產養殖戶傳遞科學資訊，也可提高他們使用昆蟲飼料的意願，訊息類型包括昆蟲飼料對漁產品食用感官特性影響、對於魚類生長與健康影響、產品安全性法規架構、消費者接受度等 (Rumbos *et al.* 2021)。

最後，昆蟲粉除可朝向發展取代水產養殖飼料中魚粉以外，因昆蟲仍有其他有益成分，對提升魚類免疫系統與腸道健康有幫助，因此朝向開發飼料微量營養添加劑，可使昆蟲源蛋白質跳脫與魚粉之價格競爭，提升昆蟲產品附加價值。

引用文獻

蕭宜庭。2020。產業篇-飼料業。頁 361-372。2020 食品產業年鑑。(簡相堂主編) 財團法人食品工業發展研究所。台北市。470 頁。

Arru, B., R. Furesi, L. Gasco, F. A. Madau and P. Pulina. 2019. The introduction of insect meal into fish diet: The first economic analysis on European sea bass farming. Sustainability 11: 1697.

Bruhn, C. M. 2007. Enhancing consumer acceptance of new processing technologies. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 8: 555-558.

Byrne, J. 2021, February 24. Demand for Insect Protein Could Hit 500,000 Tons by 2030. Feednavigator.Com. https://www.feednavigator.com/Article/2021/02/24/Demand-for-insect-protein-could-hit-500-000-tons-by-2030

FAO. 2020. The state of world fisheries and aquaculture. Food and agriculture organization of the United Nations Press. Rome, Italy. 224pp.

Govorushko, S. 2019. Global status of insects as food and feed source: A review. Trends Food Sci. Technol. 91: 436-445.

Llagostera, P. F., Z. Kallas, L. Reig, and D. A. de Gea. 2019. The use of insect meal as a sustainable feeding alternative in aquaculture: Current situation, Spanish consumers' perceptions and willingness to pay. J. Clean. Prod. 229: 10-21.

Madau, F. A., B. Arru, R. Furesi, and P. Pulina. 2020. Insect farming for feed and food production from a circular Business model perspective. Sustainability. 12:5418.

Mancuso, T., L. Baldi, and L. Gasco. 2016. An empirical study on consumer acceptance of farmed fish fed on insect meals: the Italian case. Aquac. Int. 24: 1489-1507.

Mitra, A. 2021. Thought of Alternate Aquafeed: Conundrum in Aquaculture Sustainability? Proc. Zool. Soc. 74(1) p.1-18.

Mulazzani, L., F. A. Madau, P. Pulina, and G. Malorgio. 2021. Acceptance of insect meal in aquaculture feeding: A stakeholder analysis for the Italian supply chains of trout and seabass. J. World Aquac. Soc. 52: 378-394.

Naranjo-Guevara, N., M. Fanter, A. M. Conconi, and S. Floto-Stammen. 2021. Consumer acceptance among Dutch and German students of insects in feed and food. Food Sci. Nutr. 9: 414-428.

Pippinato, L., L. Gasco, G. A. Di Vita, and T. Mancuso. 2020. Current scenario in the European edible-insect industry: a preliminary study. J. insects as Food Feed 6: 371-381.

Rumbos, C. I., E. Mente, I. T. Karapanagiotidis, G. Vlontzos, and C. G. Athanassiou. 2021. Insect-Based Feed Ingredients for Aquaculture: A Case Study for Their Acceptance in Greece. Insects 12: 586.

Sogari, G., M. Amato, I. Biasato, S. Chiesa, and L. Gasco. 2019. The potential role of insects as feed: A multi-perspective review. Anim. 9: 119.

Szendrő, K., M. Z. Nagy, and K. Tóth. 2020. Consumer acceptance of meat from animals reared on insect meal as feed. Anim. 10: 1312.

Van der Fels-Klerx, H. J., L. Camenzuli, S. Belluco, N. Meijer, and A. Ricci. 2018. Food safety issues related to uses of insects for feeds and foods. Compr. Rev. Food Sci. FoodSaf. 17: 1172-1183.

Verbeke, W., T. Spranghers, P. De Clercq, S. De Smet, B. Sas, and M. Eeckhout. 2015. Insects in animal feed: Acceptance and its determinants among farmers, agriculture sector stakeholders and citizens. Anim. Feed Sci. Technol. 204: 72-87.

Insect Protein Development Potential Analysis in Aquaculture

Ying-Chen Lin[1,*] and Kai-En Chuang[1]

[1]Agricultural Economics Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

Abstract

The consumption of fish is growing globally. Aquaculture has been predicted to provide 62% of fish for human consumption by 2030. To improve sustainability and profitability of current aquaculture practices, management of production cost and use of high nutrient aquafeed become the major challenge for continue business expansion. Fish meal is the main protein source of a farmed fish diet. Due to the limited marine resources and increasing demand in another industrial sector, international fishmeal price has been increased for a decade. High price fishmeal is a significant burden on aquaculture farmers and aquafeed companies. Therefore, finding new feeding products for partial replacement of fishmeal is required. There are several options of alternative feed protein sources include plant based feed, insect meal, earthworm meal, single cell protein and biofloc. The insect meal is more favorable following with Sustainable Development Goals than other options. Due to insect farming needs less land space and water than farming traditional livestock and cultivating soybean, processed insect protein is considered as a low environmental footprint protein source. Additionally, because attention to sustainability and sustainable consumption has been increased, insect aquafeed has a high potentiality to develop. However, ensuring insect based aquafeed economic viability is essential for business development. Economic viability assessment is in terms of acceptability of farmers and industry stakeholders, consumers’ willingness, and cost and benefits analysis. The price of imported fishmeal has been rising for decades and increasing pressure in feed industry manufacturing costs. Therefore, the use of insects for feeding farmed fish represents an alternative to reduce the dependency of fish meal. Moreover, because of nutritional properties, developing insect-based additives to improve the health of farmed animals is a strategy of adding product value. In the situation of fishmeal price increasing and attention toward sustainability, developing farmed insect and insect protein is a viable option.

Key word: Insect protein, Insect feed, Aquaculture, Market viability.

*Corresponding author.
E -mail: yclin84@tari.gov.tw

飼料用昆蟲生產技術回顧

王泰權 [1,*] 石憲宗 [1] 張淑貞 [1] 姚美吉 [1] 李啟陽 [1]

[1] 行政院農業委員會農業試驗所應用動物組。台灣 台中市。

摘要

昆蟲體內含有高成分的營養物質，包括蛋白質、脂肪酸及微量元素。昆蟲做為動物飼料的蛋白質來源有許多優勢，包括生活史短、食物轉換效率高、對於環境衝擊低，因此昆蟲已被科學界認為是未來動物性蛋白質的來源之一。由於昆蟲種類非常多樣化，具有不同的生活史，取食食物種類亦不相同，必須掌握昆蟲特殊的生態習性，才得以高效率的大量飼養。本文針對目前國際常見的飼料用昆蟲，包括麵包蟲（*Tenebrio molitor*）、黑水虻（*Hermetia illucens*）、家蠅（*Musca domestica*）、家蟋蟀（*Acheta domesticus*）及黃斑黑蟋蟀（*Gryllus bimaculatus*），彙整其生活史、飼養設備、採卵及飼養技術、飼養基質開發及蟲體收穫技術，提供昆蟲大量的飼育技術知識，期盼奠基台灣未來發展飼料用昆蟲產業之基礎。

關鍵詞：飼料昆蟲、生活史、飼養設備、飼養技術。

前言

全球面臨氣候暖化，人口持續增加，未來食物需求提高等嚴峻挑戰。昆蟲由於本身所含的營養價值高，不同種類的昆蟲粗蛋白含量為身體乾重的 34.6–74.4%，粗脂肪為 5.8–33.7%，且富含多樣化的胺基酸種類 (Barroso *et al.* 2014)。另外，昆蟲還具有生長快速、食物轉換效率高、生產所需的土地面積小及排放的溫室氣體少等優勢，使科學界聚焦在以昆蟲作為替代蛋白質的議題 (Mlček *et al.* 2014; van Huis and Oonincx 2017; Govorushko 2019; Cadinu *et al.* 2020)。

飼料用昆蟲產業在全球發展日漸蓬勃，根據國外的市場調查機構（Mordor Intelligence）估計全球飼料用昆蟲的產值，於 2018 年產值為 6.8 億美元，2024 年可達 13.9 億美元。歐盟及台灣目前皆立法將昆蟲蛋白做為動物用飼料用的蛋白質添加劑。歐盟的 2017/893 法規 (regulation) 明訂黑水虻 (*Hermetia illucens*)、家蠅 (*Musca domestica*)、麵包蟲 (*Tenebrio molitor*)、外米擬步行蟲 (*Alphitobius diaperinus*)、家蟋蟀 (*Acheta domesticus*)、帶狀蟋蟀 (*Gryllodes sigillatus*) 和牙買加蟋蟀 (*Gryllus assimilis*) 等 7 種昆蟲可以作為動物飼料之添加物；而我國「飼料管理法」中第 3 條第 1 項亦明定動物性飼料可以使用蠶蛹、蜂蛹、蠅蛆、麵包蟲、大麥蟲、孑孓、紅蟲、蝗蟲等昆蟲做為動物飼料的添加劑，同時規定水虻粉必須是以植物性飼料餵養所長成之蟲體製成。

大量飼養應用於飼料用昆蟲產業的種類包括麵包蟲、黑水虻、家蠅、蟋蟀等容易飼養的種類。為了達成昆蟲供應禽畜生產飼料的目的，昆蟲大量飼養與生產技術格外的重要。由於昆蟲種類繁多，各目昆蟲又

*論文聯繫人
E-mail: insect6925@tari.gov.tw

具有不同的生活型態，如雙翅目及鞘翅目屬於完全變態昆蟲，直翅目屬於漸進變態的昆蟲，因此針對不同種類的昆蟲，需研究發展不同昆蟲使用的飼養設施、飼養環境、昆蟲採卵技術、餌料配方及收穫方式等。為開發台灣昆蟲飼養的產業，本文針對數種國際常見之飼料用昆蟲，整理其飼養方式及相關技術，以奠基飼料昆蟲產業發展的知識基礎。

飼料昆蟲生產設備

飼養設施對於生產大量昆蟲非常重要，是自動化大量飼養的基本元素之一。基礎昆蟲飼養設施包括幾個重要的部分 : 飼養區 (rearing area)、分離與篩選區 (separation and sorting area)、清理區 (cleaning area) 及堆肥區 (compost area) (Ortiz *et al.* 2016; Cadinu *et al.* 2020)。飼養區為昆蟲飼養生長的區域，由於室內飼養的空間有限，通常會層架延伸立體空間飼養，產業上飼養麵包蟲 (圖 1A) 或黑水虻 (圖 1B) 就是以層架式的方式來進行飼養，可增加昆蟲產量。飼養區必須包括飲水與餵食系統，並且具有溫溼度監控設備 (圖 1C)。昆蟲屬於變溫動物，因此溫度變化會造成生活史的差異；此外，飼養提供的水分及營養來源也會影響昆蟲生長，影響收穫時間及產量。分離及篩選區是為了分離可收穫的目標昆蟲，比如以自動化的監控設備辨識昆蟲收穫時期，並輔以機器設計分離昆蟲、食物及糞便等殘餘物質 (圖 1 D)。清理區為清理及消毒飼養昆蟲後飼養盒等設備。堆肥區則是消耗分解昆蟲糞便及食物的殘餘物，將昆蟲飼養剩下的殘餘物用作肥料用途，以農業達循環利用目的 (Ortiz *et al.* 2016;　Cadinu *et al.* 2020)。

鞘翅目—麵包蟲飼養技術

國際上鞘翅目飼料昆蟲的種類包括麵包蟲、大麥蟲及外米擬步行蟲，這 3 種鞘翅目飼料昆蟲皆屬於擬步行蟲科 (Tenebrionidae)。擬步行蟲科的昆蟲飼養容易，幼蟲已經在寵物市場上作為餌料大量販售。擬步行蟲科內各種的飼養方式相似，僅體型大小與生活史長短有差異，主要皆以麥麩 (wheat bran) 作為飼養基質。其中以麵包蟲的應用及研究最為廣泛 (圖 2A)，本篇將麵包蟲做為擬步行蟲科昆蟲飼養技術的代表，說明如下。

麵包蟲在成蟲性成熟後於飼養基質上產卵，雌蟲伸出生殖器將卵產在食物基質中，為了避免成蟲取食麥麩而誤食蟲卵，可使用篩網將成蟲與蟲卵隔開，避免成蟲取食黏於麥麩的卵 (圖 2B)。篩網建議使用孔徑 850 µm 的 20 號篩網，於篩網下放置麥麩作為產卵基質，阻隔成蟲與產卵基質。雌成蟲產卵時的最佳密度為 0.14 隻/cm^2，密度過高會造成產卵效果不佳，羽化後 2–3 週的雌成蟲產卵效率最佳 (Morales-Ramos *et al.* 2012)，但是亦有研究顯示雌成蟲產卵最佳密度為 0.84 隻/cm^2，產卵數高峰在羽化後於第 6 d (Berggreen *et al.* 2018)。總結上述研究，雌成蟲密度介於 0.14–0.84 隻/ cm^2 為最佳，羽化後 1–3 週產卵效率最佳。

麵包蟲幼蟲的齡期變化大，14–18 個齡期都有，因此發育時間也隨之不同，卵期 5–7 d，幼蟲期 129–216 d，最適生長溫度為 25–27.5 ℃ (Koo *et al.* 2013; Kim *et al.* 2015; Morales-Ramos *et al.* 2015)。除了溫度會影響生活史，食物的營養成分也會造成齡期和生長的差異，麥麩中加入馬鈴薯粉或奶粉的飼料可縮短齡期 (Morales-Ramos *et al.* 2013)。

麵包蟲幼蟲的食性複雜，可取食多種農業副產物，主要以穀物為主，其中以麥麩對其生長影響為最佳 (Rumbos *et al.* 2020)，因此飼養麵包蟲多數以此作為主要食物基質。在飼養過程中除了供給主要飼料基質外，水分的供給對於生長發育也十分重要，供給水與不供水的實驗中，沒有供給水源的麵包蟲明顯發育時間較長，而且重量較輕 (Urs & Hopkins 1973)。作為水分來源的新鮮植物同時提供多樣維生素營養，比較僅取食麥麩和麥麩添加新鮮植物 (如紅萵苣、馬鈴薯、紅蘿蔔或柑橘) 的實驗，顯示取食新鮮植物的麵包蟲增加 40–46% 的生長率，由此可知新鮮植物為飼養

麵包蟲不可或缺的營養補充劑 (Liu *et al.* 2020)。

擬步行蟲科的飼養，幼蟲密度的增加會造成幼蟲發育漸緩，食物轉換效率變差 (Morales-Ramos & Rojas 2015)，進一步造成產生較多體重較輕的蛹，亦會導致化蛹不完全的現象出現 (Weaver & McFarlane 1990; Park *et al.* 2012)。

在大量飼養過程中，由於麵包蟲具有同類相殘的行為，養殖到生長後期的化蛹階段，蛹必須和幼蟲進行分離，若於同一空間，蛹容易被幼蟲攻擊致死，可使用孔徑 3.5 mm 的 8 號篩網分離蛹，或在飼養中使用可讓幼蟲通過，但可攔阻蛹通過的篩網。目前自動分離的設備已經有發展出轉彎式氣流分離機 (zig-zag air separator) 來分離幼蟲、食物與糞便，更有研發幼蟲影像辨識技術來做為未來自動化飼養的研究 (Kröncke *et al.* 2020)。

雙翅目—黑水虻及家蠅飼養技術

黑水虻飼養技術

黑水虻屬於雙翅目 (Diptera) 水虻科 (Stratiomyidae) 的昆蟲 (圖 3A、3B)，主要分布在熱帶與亞熱帶地區，產卵與其成蟲獲得的營養息息相關，研究顯示餵食成蟲糖水，可以增加產卵量、產卵時間和成蟲壽命 (Macavei *et al.* 2020)。黑水虻產卵於食物基質附近的隙縫中，因此大量飼養下，採卵會將成蟲放置於大型的尼龍網內，緣由為交尾模式具有特殊的交尾場行為 (Lekking behavior)，亦即雄性個體會有聚集行為與雌蟲進行交尾 (Tomberlin & Sheppard 2001)。所以產卵場域使用的尼龍網必須維持至少 1.0 × 1.0 × 2.5 m 以上空間 (圖 3 C)，最後放入產卵基質誘集卵塊 (Kim *et al.* 2016)。通常使用木頭堆成塊狀 (圖 3 D)、堆疊而成的紙板、或是水族市場使用的生化球 (bioball) 做為採卵器具，將採卵器具放置於腐敗的有機質中供成蟲產卵，皆能獲得不錯的產卵效果 (Sheppard *et al.* 2002; Dortmans *et al.* 2017; Hoc *et al.* 2019)。

黑水虻的幼蟲食性極為複雜，由於其廣泛的食性，目前各國已經應用幼蟲處理各種的生物廢棄物。常見飼養基質有無毒的有機物質，如動物糞便、動物或植物的廢棄物、麥麩、玉米粉或是苜蓿粉所組成之飼料，飼養基質的水分含量最適約為 60–90%，在不同飼養基質飼養下，幼蟲的生長率及營養組成與食物來源習習相關 (Sheppard *et al.* 2002; Myers *et al.* 2014; Nguyen *et al.* 2015; Barragán-Fonseca *et al.* 2018; Gold *et al.* 2018)。

幼蟲最適合飼養溫度為 25–30°C，相對溼度為 70%，喜愛黑暗的環境。於 25 和 30°C 的溫度飼養下，幼蟲期分別為 32.8 d 和 24.7 d，蛹期為 22.3 d 和 13.0 d，成蟲壽命為 10.2 和 9.2 d (Shumo *et al.* 2019)。黑水虻的收集可以應用前蛹會離開潮濕的環境化蛹的特性，對潮濕基質進行非震動式的網篩法，對破碎化的基質使用震動式的網篩法 (Dortmans *et al.* 2017)。

家蠅飼養技術

家蠅為全球廣泛分布的物種，屬於雙翅目 (Diptera) 家蠅科 (Muscidae)，生活史短，幼蟲期約 8–10 d，蛹期約 6–7 d (Pastor *et al.* 2014)。成蟲飼料可以以奶粉、蔗糖或是酵母粉混合而成 (Shipp & Osborn 1967; Pastor *et al.* 2011; Pastor *et al.* 2014)。採產方式可以使用動物糞便或是發酵的麥麩誘集成蟲產卵 (Pastor *et al.* 2011; Tang *et al.* 2016; Hussein *et al.* 2017)，採卵後即可將家蠅的卵移至飼料基質上飼養。最適合生長的飼料水分含量大約為 50–80%，飼料中水分超過 90% 或低於 40% 皆會影響幼蟲的生長 (Farkas *et al.* 1998)。幼蟲的飼料配方非常多樣化，例如各種的動物糞便 (豬糞、雞糞或牛糞) (Larraín & Salas 2008; Roffeis *et al.* 2015; Hussein *et al.* 2017; Miranda *et al.* 2020)，目前亦發展出植物源飼養配方，如麥麩、苜蓿粉、玉米粉及啤酒酵母粉混合，再將其與水進行 1:1 混合，即成為家蠅的飼養配方 (Hogsette 1992; Miranda *et al.* 2020)。最適

飼養溫度為 25–32℃，相對濕度為 65–75% (Ortiz *et al*. 2016)。目前蟲體的收集方式有應用篩網篩選、低氧環境誘使幼蟲離開飼養基質、或自動收集裝置進行蛹的分離等。

直翅目—蟋蟀飼養技術

蟋蟀飼養最常見的種類為家蟋蟀和黃斑黑蟋蟀，家蟋蟀的卵期 10–14 d，若蟲期 40–45 d，成蟲期 40–55 d；而黃斑蟋蟀的卵期為 7–10 d，若蟲期 30–35 d，成蟲期 30–40 d。蟋蟀一般飼養 20–35 d 後開始收穫，理論上約 33 d 收穫 1 次，每年可收穫 11 次。蟋蟀適合的生長溫度為 28–30℃ (Clifford & Woodring 1990; Booth & Kiddell 2007)。

蟋蟀的採卵方式，可以使用泥炭土 (peat moss) 或砂土給予成蟲產卵 (Clifford & Woodring 1990; Hanboonsong & Durst 2020; Reverberi 2020)。飼養蟋蟀的飼料非常多樣化，如已開發的 Patton 13 蟋蟀飼料，是以大豆粉、玉米粉、全脂奶粉、脫脂奶粉、去脂牛肝、麥麩、酵母粉組成，因此測試蟋蟀飼料配方試驗都以此作為對照組；動物飼料如雞飼料、兔子飼料亦可；植物性配方飼料如玉米粉、大豆粉、玉米油、磷酸氫鈣、碳酸鈣、碘鹽。除了飼料之外，飼養過程中可以加入新鮮的植物基質，如 10 d 大的若蟲即可開始添加木瓜葉、樹薯葉或是南瓜切片等植物 (Patton 1963; Collavo *et al*. 2005; Hanboonsong & Durst 2020; Morales-Ramos *et al*. 2020)。

蟋蟀的飼養環境必須有大空間給予躲藏，通常使用大型箱子 (圖 4A) 或大型水泥方形結構作為飼養槽，裡面放置蛋盒或是紙團提供躲藏空間 (圖 4B)，盒子上方覆蓋網子避免逃逸或是捕食性天敵進入，箱內設置盛放水源及食物的容器 (Clifford & Woodring 1990; Collavo *et al*. 2005; Hanboonsong & Durst 2020)。蟋蟀的收集方式相當簡單，只要將飼養槽中的蛋盒集中於角落，迫使蟋蟀躲入角落的蛋盒中，隨後搖動蛋盒，收集蛋盒中的蟋蟀及進行熱水消毒、包裝以應用於飼料或食物市場 (Hanboonsong & Durst 2020)。

結語

昆蟲生活史短且繁殖能力迅速，只要掌握不同種類昆蟲的產卵、取食行為、食料、飼養設備、溫溼度條件，即可成功大量飼養昆蟲。大規模的飼養下必須注意病菌及天敵的發生，以往曾有蟋蟀麻痺病毒 (cricket paralysis virus) 重創蟋蟀飼養產業，亦有發生麵包蟲感染白殭菌 (*Beauveria bassiana*) 的案例，因此昆蟲飼養時必須謹慎控制溫度與溼度，避免使用帶病的種蟲生產繁殖，並且加強飼養器具的衛生管理 (Eilenberg *et al*. 2015)。為了降低昆蟲大量飼養的生產成本，未來應開發價格更便宜且高效的食物配方，也可以將昆蟲飼養生產自動化以減少人力成本，除了目前以氣流或是物理方式開發的昆蟲分離技術，未來亦可結合人工智慧影像辨識系統，更精確的選別大量飼養的昆蟲，以進一步簡化飼養模式。

致謝

本文有關國內飼料用昆蟲大量飼養的圖片，非常感謝萌芽生物科技有限公司的卓先生、晁陽農產科技股份有限公司的黃先生、龍蝦宴的葉先生，同意提供黑水虻、黃斑黑蟋蟀及麵包蟲之飼養設備拍攝及飼育流程的資料收集。

參考文獻

Barragán-Fonseca, K., J. Pineda-Mejia, M. Dicke, and J. J. van Loon. 2018. Performance of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) on vegetable residue-based diets formulated based on protein and carbohydrate contents. J. Econ. Entomol. 111: 2676–2683.

Barroso, F. G., C. de Haro, M. J. Sánchez-Muros, E. Venegas, A. Martínez-Sánchez, and C. Pérez-Bañón. 2014. The potential of various insect species for use as food for fish. Aquaculture. 422: 193–201.

Berggreen, I., J. Offenberg, M. Calis, and L.-H. Heckmann. 2018. Impact of density, reproduction period and age on fecundity of the yellow mealworm Tenebrio molitor (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Insects Food Feed 4: 43–50.

Booth, D. T. and K. Kiddell. 2007. Temperature and the energetics of development in the house cricket (*Acheta domesticus*). J. Insect Physiol. 53: 950–953.

Cadinu, L. A., P. Barra, F. Torre, F. Delogu, and F. A. Madau. 2020. Insect rearing: Potential, challenges, and circularity. Sustainability 12: 4567.

Clifford, C. W. and J. Woodring. 1990. Methods for rearing the house cricket, Acheta domesticus (L.), along with baseline values for feeding rates, growth rates, development times, and blood composition. J. Appl. Entomol. 109: 1–14.

Collavo, A., R. H. Glew, Y. S. Huang, L. T. Chuang, R. Bosse, and M. G. Paoletti. 2005. House cricket small-scale farming. p. 515–540. in: Ecological Iimplications of Minilivestock: potential of insects, rodents, frogs and snails. (Paoletti M. G. ed.) Science Publishers, Inc. Enfield, New Hampshire, U.S.A. 648 pp.

Dortmans, B., S. Diener, B. Verstappen, and C. Zurbrugg. 2017. Black soldier fly biowaste processing-a step-by-step guide Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Dubendorf, Switzerland.

Eilenberg, J., J. Vlak, C. Nielsen-LeRoux, S. Cappellozza, and A. Jensen. 2015. Diseases in insects produced for food and feed. J. Insects Food Feed 1: 87–102.

Farkas, R., J. A. Hogsette, and L. Börzsönyi. 1998. Development of Hydrotaea aenescens and Musca domestica (Diptera: Muscidae) in poultry and pig manures of different moisture content. Environ. Entomol. 27: 695–699.

Gold, M., J. K. Tomberlin, S. Diener, C. Zurbrügg, and A. Mathys. 2018. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. Waste Manage. 82: 302–318.

Govorushko, S. 2019. Global status of insects as food and feed source: A review. Trends Food Sci. Technol. 91: 436–445.

Hanboonsong, A., and P. Durst. 2020. Guidance on sustainable cricket farming–a practical manual for farmers and inspectors, Food & Agriculture Org.

Hoc, B., G. Noël, J. Carpentier, F. Francis, and R. Caparros Megido. 2019. Optimization of black soldier fly (*Hermetia illucens*) artificial reproduction. PLoS One 14: e0216160.

Hogsette, J. A. 1992. New diets for production of house flies and stable flies (Diptera: Muscidae) in the laboratory. J. Econ. Entomol. 85: 2291–2294.

Hussein, M., V. V. Pillai, J. M. Goddard, H. G. Park, K. S. Kothapalli, D. A. Ross, Q. M. Ketterings, J. T. Brenna, M. B. Milstein, and H. Marquis. 2017. Sustainable production of housefly (*Musca domestica*) larvae as a protein-rich

feed ingredient by utilizing cattle manure. PLoS One 12: e0171708.

Kim, S. Y., J. B. Park, Y. B. Lee, H. J. Yoon, K. Y. Lee, and N. J. Kim. 2015. Growth characteristics of mealworm Tenebrio molitor. J. Seric. Entomol. Sci. 53: 1–5.

Kim, W., E. Kim, J.-Y. Choi, and S.-H. Kim. 2016. Effect of adult population density on egg production in the black soldier fly, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae). Int. J. Ind. Entomol. 33: 92–95.

Koo, H. Y., S. G. Kim, H. K. Oh, J. E. Kim, D. S. Choi, D. I. Kim, and I. Kim. 2013. Temperature-dependent development model of larvae of mealworm beetle, *Tenebrio molitor* L.(Coleoptera: Tenebrionidae). Korean J. Appl. Entomol. 52: 387–394.

Kröncke, N., A. Baur, V. Böschen, S. Demtröder, R. Benning, and A. Delgado. 2020. Automation of Insect Mass Rearing and Processing Technologies of Mealworms (*Tenebrio molitor*), pp. 123–139, African Edible Insects As Alternative Source of Food, Oil, Protein and Bioactive Components. Springer.

Larraín, P., and C. Salas. 2008. House fly (*Musca domestica* L.)(Diptera: Muscidae) development in different types of manure. Chil. J. Agric. Res. 68: 192-197.

Liu, C., J. Masri, V. Perez, C. Maya, and J. Zhao. 2020. Growth performance and nutrient composition of mealworms (*Tenebrio molitor*) fed on fresh plant materials-supplemented diets. Foods 9: 151.

Macavei, L. I., G. Benassi, V. Stoian, and L. Maistrello. 2020. Optimization of *Hermetia illucens* (L.) egg laying under different nutrition and light conditions. PLoS One 15: e0232144.

Miranda, C., J. Cammack, and J. Tomberlin. 2020. Life-history traits of house fly, *Musca domestica* L.(Diptera: Muscidae), reared on three manure types. J. Insects Food Feed 6: 81–90.

Mlček, J., O. Rop, M. Borkovcova, and M. Bedná řov á . 2014. A comprehensive look at the possibilities of edible insects as food in Europe-A Review. Polish J. Food Nutr. Sci. 64: 147–157..

Morales-Ramos, J. A. and M. G. Rojas. 2015. Effect of larval density on food utilization efficiency of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Econ. Entomol. 108: 2259–2267.

Morales-Ramos, J. A., M. G. Rojas, A. T. Dossey, and M. Berhow. 2020. Self-selection of food ingredients and agricultural by-products by the house cricket, *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae): a holistic approach to develop optimized diets. PLoS One 15: e0227400.

Morales-Ramos, J. A., M. G. Rojas, S. Kay, D. I. Shapiro-Ilan, and W. L. Tedders. 2012. Impact of adult weight, density, and age on reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Entomol. Sci. 47: 208–220.

Morales-Ramos, J. A., M. G. Rojas, D. I. Shapiro-Ilan, and W. L. Tedders. 2013. Use of nutrient self-selection as a diet refining tool in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Entomol. Sci. 48: 206–221.

Morales-Ramos, J. A., S. Kay, M. G. Rojas, D. I. Shapiro-Ilan, and W. L. Tedders. 2015.

Morphometric analysis of instar variation in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 108: 146–159.

Myers, H. M., J. K. Tomberlin, B. D. Lambert, and D. Kattes. 2014. Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure. Environ. Entomol. 37: 11–15.

Nguyen, T. T., J. K. Tomberlin, and S. Vanlaerhoven. 2015. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste. Environ. Entomol. 44: 406–410.

Ortiz, J. C., A. T. Ruiz, J. Morales-Ramos, M. Thomas, M. Rojas, J. Tomberlin, L. Yi, R. Han, L. Giroud, and R. Jullien. 2016. Insect mass production technologies, pp. 153–201, Insects as sustainable food ingredients. Elsevier.

Park, Y. K., Y. C. Choi, Y. B. Lee, S. H. Lee, J. S. Lee, and S. H. Kang. 2012. Fecundity, life span, developmental periods and pupal weight of *Tenebrio molitor* L.(Coleoptera: Tenebrionidae). J. Seric. Entomol. Sci. 50: 126–132.

Pastor, B., A. S. Martinez-Sanchez, G. A. Ståhls, and S. Rojo. 2014. Introducing improvements in the mass rearing of the housefly: biological, morphometric and genetic characterization of laboratory strains. Bull. Entomol. Res. 104: 486–493.

Pastor, B., H. Čičková, M. Kozanek, A. Martinez-Sanchez, P. Takáč, and S. Rojo. 2011. Effect of the size of the pupae, adult diet, oviposition substrate and adult population density on egg production in *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). Eur. J. Entomol. 108: 587–596.

Patton, R. 1963. Rearing the House Cricket, *Aeheta domesticus*, on Commercial Feed. Ann. Entomol. Soc. Am. 56: 250–251.

Reverberi, M. 2020. Edible insects: cricket farming and processing as an emerging market. J. Insects Food Feed 6: 211–220.

Roffeis, M., B. Muys, J. Almeida, E. Mathijs, W. Achten WMJ, B. Pastor, Y. Velásquez, A. I. Martinez-Sanchez, and S. Rojo. 2015. Pig manure treatment with housefly (*Musca domestica*) rearing–an environmental life cycle assessment. J. Insects Food Feed 1: 195–214.

Rumbos, C. I., I. T. Karapanagiotidis, E. Mente, P. Psofakis, and C. G. Athanassiou. 2020. Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor*. Sci. Rep. 10: 1–10.

Sheppard, D. C., J. K. Tomberlin, J. A. Joyce, B. C. Kiser, and S. M. Sumner. 2002. Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). J. Med. Entomol. 39: 695–698.

Shipp, E. and A. Osborn. 1967. The effect of protein sources and of the frequency of egg collection on egg production by the housefly (*Musca domestica* L.). Bull. World Health Organ. 37: 331–335.

Shumo, M., F. M. Khamis, C. M. Tanga, K. K. Fiaboe, S. Subramanian, S. Ekesi, A. Van Huis, and C. Borgemeister. 2019. Influence of temperature on selected life-history traits of black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared on two common urban organic waste streams in Kenya. Animals 9: 79.

Tang, R., F. Zhang, J. H. Chen, F. Zhu, R. C. Han, C. L. Lei, M. Kenis, L. Q. Huang, and C. Z. Wang. 2016. Identification and testing of oviposition

attractant chemical compounds for *Musca domestica*. Sci. Rep. 6: 1–9.

Tomberlin, J. K. and D. C. Sheppard. 2001. Lekking behavior of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). Fla. Entomol.: 729–729.

Urs, K. and T. Hopkins. 1973. Effect of moisture on growth rate and development of two strains of *Tenebrio molitor* L.(Coleoptera, Tenebrionidae). J. Stored Prod. Res. 8: 291–297.

van Huis, A. and D. G. Oonincx. 2017. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. Agron. Sustain. Dev. 37: 1–14.

Weaver, D. K. and J. McFarlane. 1990. The effect of larval density on growth and development of *Tenebrio molitor*. J. Insect Physiol. 36: 531–536.

圖 1. 昆蟲大量飼養的設備。(A) 飼養麵包蟲的層架式設計；(B) 飼養黑水虻的塑膠盤；(C) 溫溼度監控設備；(D) 自動蟲體分離機器。

Fig. 1. The equipment for insect mass rearing. (A) The layer holder design for mealworm; (B) plastic trays for black solider fly; (C) temperature and humidity control devices; (D) insect separator machine.

圖 2. 麵包蟲的大量飼養過程。(A) 麵包蟲的幼蟲；(B) 成蟲以網篩阻隔食物的採卵方式。

Fig. 2. The procedure of mass rearing of mealworm. (A) mealworm larva; (B) the egg collection separating food and adult by sieve.

圖 3. 黑水虻的大量飼養。(A) 成蟲；(B) 幼蟲與前蛹；(C) 交尾場；(D) 採卵器具。

Fig. 3. Mass rearing of black soldier fly. (A) Adult; (B) larva and prepupa; (C) mating space and (D) egg collection devices.

圖 4. 飼養蟋蟀的設備。(A) 大型整理箱；(B) 提供給蟋蟀躲藏空間的紙團。

Fig. 4. The equipment for cricket farming. (A) Big plastic boxes; (B) hiding space made by papers (B)

The Review of Rearing Technologies of Insects as Feed

Tai-Chuan Wang[1,*], Hsien-Tzung Shih[1], Shu-Chen Chang[1], Me-Chi Yao [1], and Chi-Yang Lee [1]

[1] Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung city, Taiwan, ROC.

Abstract

Insects contain high nutrients including protein, fatty acid, and minerals. Insects as a protein source for animal feed have many advantages, including short life cycle, high food conversion rate, low environmental impact. Therefore, insects have been regarded as alternative protein source in the future. As insect species are very diverse with different life cycles and different foods they eat, it is necessary to understand their special behaviors in order to be able to complete the mass rearing of them efficiently. The review focuses on common insect species as feed, like mealworm (*Tenebrio molitor*), black solider fly (*Hermetia illucens*), housefly (*Musca domestica*), house cricket (*Acheta domesticus*) and two-spotted cricket (*Gryllus bimaculatus*) and describes their life cycles, rearing equipments, oviposition methods, feeding substrate developments and harvest of targeted insect. We do hope that such knowledge related to insect breeding technology can form the foundation for the future development of the feed insect industry in Taiwan.

Key words: Insects as feed, Life cycle, Rearing equipment, Rearing technologies.

*Corresponding author.
E-mail: insect6925@tari.gov.tw

國家圖書館出版品預行編目 (CIP) 資料

昆蟲應用於動物飼料產業現況研討會專刊. 2021 = Proceedings of the symposium on 2021 status of insect application in the animal feed industry/王泰權, 石憲宗, 吳明城, 李啟陽, 李懿珊, 林彣郁, 林盈甄, 林娟如, 姚美吉, 洪乙庭, 馬威鈞, 張淑貞, 梁佑全, 莊凱恩, 郭怡君, 郭恬岎, 陳妤欣, 陳昌岑, 陳健忠, 陳培梅, 陳淑佩, 楊文欽, 楊詠嵐, 葉昇炎, 鐘仁甫 ; 張淑貞, 李啟陽, 董耀仁, 陳淑佩主編. -- 初版. -- 臺中市 : 行政院農業委員會農業試驗所, 民110.11

面 ：21*29.7 公分 (農業試驗所特刊；第 234 號)

ISBN 978-986-5455-98-9 (平裝)

1.飼料　2.產業發展

437.114　　110020264

編　號：農業試驗所特刊號 234 號
書　名：2021 昆蟲應用於動物飼料產業現況研討會專刊
發 行 人：林學詩
主　編：張淑貞、李啟陽、董耀仁、陳淑佩
作　者 (依姓氏筆畫排序)：
王泰權、石憲宗、吳明城、李啟陽、李懿珊、林彣郁、林盈甄、林娟如、姚美吉、洪乙庭、馬威鈞、張淑貞、梁佑全、莊凱恩、郭怡君、郭恬岎、陳妤欣、陳昌岑、陳健忠、陳培梅、陳淑佩、楊文欽、楊詠嵐、葉昇炎、鐘仁甫
封面設計/內頁排版：趙冠程、林秀枝、鄧文秀
研討會籌備幹部 (依姓氏筆畫排序)：
王泰權、石憲宗、申屠萱、江明耀、李啟陽、許北辰、姚美吉、張淑貞、陳淑佩、董耀仁、鄧文秀
出 版 者：行政院農業委員會農業試驗所
地址：臺中市霧峰區中正路189號　傳真：(04) 2333-8162
電話：(04) 2330-2301　網址：https://www.tari.gov.tw
出版年月：中華民國 110 年 11 月初版
定　價：非賣品
農試所出版品 2021年 004 號
電子書系統號：259883
ISBN：978-986-5455-98-9
GPN：4711000044

推廣用